

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Modernizace pohonu krystalizátoru plasmové pece

The modernization of drive crystallizer plasma furnace

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Marek Mucha**
Studijní program: N2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3907T001 Elektroenergetika
Téma: **Modernizace pohonu krystalizátoru plazmové pece**
The modernization of drive crystallizer plasma furnace

Zásady pro vypracování:

- 1) Teoretický rozbor, Stručně účel plazmová pece, problematika soustav pohonů, motory , napájení a měniče, charakteristiky a volba.
- 2) Popis plazmové pece, rozbor provedení současného pohonu krystalizátoru, rozbor pracovních stavu, parametrů a požadavků, analýza pracovních veličin.
- 3) Návrh provedení nového systému pohonu ve verzích stejnosměrný pohon a střídavý pohyb, praktická typová volba elektroprvků.
- 4) Zhodnocení a závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:
dle osobního doporučení

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Martin Marek, Ph.D.**

Datum zadání: 30.11.2011

Datum odevzdání: 04.05.2012


prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry




prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení:

„Místopřísežně prohlašuji, že jsem předloženou diplomovou práci vypracoval samostatně a uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“



Poděkování:

Na tomto místě bych rád poděkoval hlavně panu Ing. Martinu Markovi, Ph.D. za vedení a cenné rady při tvorbě této diplomové práce, panu Ing. Danielu Petlákovu za umožnění přístupu do laboratoře s plazmovou pecí, a v neposlední řadě své rodině a přátelům za poskytnutou podporu. Bez jejich přispění by tato práce nevznikla.

V Ostravě

dne: 30. 4. 2012

Abstrakt

Tato diplomová práce řeší návrh nového řízení pohonu pro posuv vsázky v pracovním prostoru plazmové pece, která byla v době vzniku této práce umístěna v laboratoři J129 na půdě Vysoké školy Báňské – Technické univerzity Ostrava.

Pec je vybavena stejnosměrným pohonem sestávajícím z elektronkového měniče napětí a jím poháněného elektromotoru. V první části práce je tedy uvedena teorie plazmy, popis obecné plazmové pece a stejnosměrných motorů. Popis konkrétní řešené aplikace, včetně provedených měření, je uveden v druhé části.

Jako nové řízení byl navržen střídavý pohon složený z měniče kmitočtu a asynchronního motoru. V práci je proto uvedena i teorie střídavého stroje. Samotný návrh je potom umístěn na konci práce.

Klíčová slova

Plazma, termická ionizace, plazmová pec, krystalizátor, unášec vsázky, pohon plazmové pece, stejnosměrné motory, cize buzený motor, střídavé motory, asynchronní motor, frekvenční měnič, otáčky motoru, frekvence, jmenovitý výkon.

Abstract

This thesis is solving the melt shifter new drive design for plasma furnace placed in the laboratory J129 on the ground of VŠB – Technical University of Ostrava.

The furnace is equipped with DC drive, which consists of an old design electronical voltage changer and DC engine. The first part of this thesis contains plasma theory, general plasma furnace and DC engines description. Description of given furnace, including performed measurements, is placed in the second part.

As a new way to control the melt shifter was designed an AC drive consists of a frequency changer and asynchronous engine. That is why an AC engines theory is also mentioned. The new drive design itself is placed at the end of the thesis.

Key Words

Plasma, thermal ionization, plasma furnace, crystallizer, melt shifter, plasma furnace drive, DC engines, foreign excited engine, AC engines, asynchronous engine, frequency changer, engine revolutions, frequency, nominal load.

Seznam použitých symbolů a zkratk

značka	název	jednotka
B	magnetická indukce	[T]
$\cos\varphi$	účinník	[-]
D	průměr rotoru	[mm]
e	Eulerovo číslo	[-]
e_0	elementární náboj	[C]
F	síla	[N]
f	frekvence	[Hz]
F_m	magnetické napětí celého obvodu	[V]
H	intenzita magnetického pole	[A/m]
i	převodový poměr převodovky	[-]
i, I	elektrický proud	[A]
k_E	konstanta úměrnosti	[-]
l	délka	[m]
M_i	elektromagnetický moment	[Nm]
N	počet závitů cívky	[-]
n	otáčky motoru	[min ⁻¹]
n_s	synchronní otáčky motoru	[min ⁻¹]
p	tlak v plynu	[Pa]
p	počet pólových dvojic	[-]
P	výkon	[W]
Q	počet drážek rotoru	[-]
Q_p	počet drážek na pólovou rozteč	[-]
R	elektrický odpor	[Ω]
s	skluz motoru	[-]
T	termodynamická teplota	[K]
t	čas	[s]
u, U	elektrické napětí	[V]
U_i	ionizační potenciál	[V]
v	rychlost	[m/s]
V_i	magnetické napětí části magnetického obvodu	[V]
x	stupeň ionizace	[-]
Z	impedance	[Ω]
η	účinnost	[-]
v	míra sycení magnetického obvodu	[-]
τ_p	pólová rozteč	[mm]
Φ	magnetický tok	[Wb]
ω	úhlová rychlost	[rad/s]

[1] odkaz na literární pramen

(1) označuje číslo vzorce nebo na něj odkazuje

Obsah

1. Úvod	8
2. Plazma	9
2.1. Definice	9
2.2. Vznik plazmy.....	9
2.3. Stupeň ionizace.....	10
3. Plazmové pece s krystalizátory	11
3.1. Obecný rozbor typové plazmové pece.....	13
3.2. Základní součásti řešené plazmové pece	15
3.3. Napájení plazmové pece.....	17
4. Stejnoseměrné motory	18
4.1. Princip funkce stejnosměrného motoru	18
4.2. Stejnoseměrné vinutí	19
4.3. Magnetický obvod	20
4.4. Indukované napětí	22
4.5. Elektromagnetický moment.....	23
4.6. Motor s cizím buzením.....	23
4.6.1. Spouštění.....	24
4.6.2. Chod naprázdno	24
4.6.3. Zatěžování.....	24
4.6.4. Řízení rychlosti	26
4.6.5. Využití.....	26
4.7. Motor s paralelním buzením.....	26
4.7.1. Využití.....	27
4.8. Motor se sériovým buzením	27
4.8.1. Spouštění.....	27
4.8.2. Zatěžování.....	28
4.8.3. Řízení rychlosti	28
4.8.4. Využití.....	29
4.9. Motor s kompaundním buzením.....	29
5. Asynchronní stroje.....	30
5.1. Princip funkce.....	31
5.2. Konstrukční provedení	31

5.3. Spouštění asynchronních motorů s kotvou nakrátko	32
5.3.1. Přímé připojení na napájecí síť	32
5.3.2. Spouštění se sníženým napětím	32
5.3.3. Spouštění přepínačem hvězda trojúhelník	33
5.3.4. Spouštění motorů se speciálním vinutím rotoru.....	34
5.3.5. Spouštění střídavým měničem napětí	34
5.4. Spouštění asynchronních motorů s kotvou kroužkovou	35
5.5. Řízení otáček asynchronních strojů	35
5.5.1. Řízení otáček změnou skluzu.....	35
5.5.2. Řízení otáček změnou pólových dvojic	36
5.5.3. Řízení otáček změnou frekvence statoru	37
6. Rozbor provedení současného pohonného systému krystalizátoru plazmové pece	38
6.1. Základní popis a definice problému	38
6.2. Výčet součástí a blokové schéma	38
6.3. Popis vybraných součástí	39
6.3.1. Rozvaděč RM1.....	39
6.3.2. Elektronkový řídicí obvod	40
6.3.3. Elektromotor	40
6.3.4. Převodovka	40
6.4. Měření 1.....	41
6.5. Měření 2.....	43
7. Návrh nového systému pro pohon posuvu krystalizátoru	44
7.1. Požadavky.....	44
7.2. Předpisy	44
7.3. Normy	45
7.4. Napěťová soustava	46
7.5. Ochrana před úrazem elektrickým proudem.....	46
7.6. Vnější vlivy	46
7.7. Technické řešení.....	46
7.8. Soupis vybraných přístrojů.....	47
7.8.1. Frekvenční měnič.....	47
7.8.2. Elektromotor	49
8. Závěr	50
Seznam použité literatury.....	52

1. Úvod

Plazmová metalurgie je dnes jedním z nejperspektivnějších odvětví průmyslového zpracování kovů a výroby nových materiálů. Tyto materiály jsou pak schopny vyhovět dnešním stále se zvyšujícím nárokům na jejich elektrické, magnetické, pevnostní, antikorozi a jiné chemické a fyzikální vlastnosti.

Ačkoliv představa využití teploty ionizovaného plynu v průmyslové metalurgii není žádnou novinkou, k progresivnímu rozvoji dochází až v posledních desetiletích. Zásahu na tom má především větší informační provázanost jak vědeckých, tak i průmyslových pracovišť, zlevnění elektrické energie (díky rozvoji atomových elektráren) a konečně také rozvoj technologie, umožňující řešení technických obtíží plazmových aplikací.

Řešením jednoho z mnoha těchto technických problémů, se zabývá i tato práce. Jedná se o návrh modernizace napájecího systému pro motor pohonu krystalizátoru plazmové pece. Práce volně navazuje na práci Petra Stoklasy^[5] a klade si za cíl odstranit nežádoucí časovou prodlevu mezi aktivací pultu a samotným posuvem unášče vsázky v krystalizátoru pece.

Plazmové pece obecně se vyskytují dvojího druhu. Jsou jimi tavící pece s „nístějí vyzdřenou žáruvzdorným materiálem“ a pece s „kovovými vodou chlazenými (vertikálními či horizontálními) krystalizátory“.

V prvním případě jsou tyto pece ne nepodobné pecím obloukovým s tím rozdílem, že využívají plazmové hořáky (namísto obloukových elektrod) a speciální půdní elektrodu. Je u nich také požadavek na vakuovou těsnost k udržení přesně specifikované inertní atmosféry v pracovním prostoru pece.

V druhém případě můžeme shledat podobnost s pecemi elektronovými. Pec ovšem opět využívá plazmových hořáků (namísto elektronových děl) a pracuje s inertní atmosférou při tlaku 10^5 Pa (pouze výjimečně s vakuem či přetlakem). Tato práce se dále zabývá rozbohem a návrhem pohonného systému právě pro tento typ pece při horizontálním uspořádání krystalizátoru.

2. Plazma

2.1. Definice

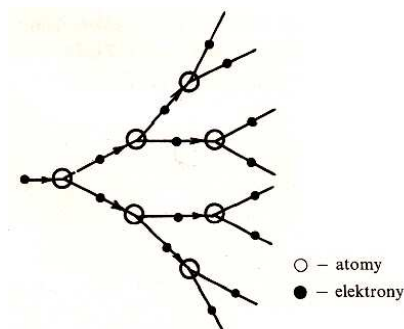
Obecně se uvádí, že plazma je čtvrtým skupenstvím hmoty. Existují však i další definice. Seelingerova definice říká, že „Za plazma považujeme směs elektronů a iontů, která může být a většinou je rozprostřena uvnitř plynu z neutrálních částic. Jako celek musí být plazma elektricky neutrální“.^[3]

Podle R. Engela je plazma ionizovaný plynný systém se stejnou koncentrací kladných a záporných nábojů. Na rozdíl od plynu je plazma elektricky vodivé, má velkou tepelnou kapacitu a vodivost. Podléhá účinkům elektrického a magnetického pole.^[3]

Další, a asi nejužívanější, definice říká, že plazma je kvazineutrálním souborem částic s volnými nosiči nábojů, vykazujícím kolektivní chování. Při metalurgických procesech se často pracuje s pojmem *nízkoteplotní plazma*. To je určeno jako systém skládající se ze směsi neutrálních částic s převládajícím počtem elektronů a kladných iontů s teplotami řádu $10^3 - 10^5$ K. Za zcela ionizované plazma pak považujeme teploty řádu 10^5 K.^[3]

2.2. Vznik plazmy

Plazma vzniká ve sloupci elektrického oblouku termickou ionizací v uzavřeném prostoru bez možnosti působení vnějších vlivů za vysokých teplot (řádově 10^3 K). Využívá se výbojů ve vysokofrekvenčním elektrickém poli nebo častěji výboje mezi dvěma nebo více elektrodami. Používá se střídavý, ale častěji stejnosměrný proud. Základem ionizace je vznik elektronových lavin, mající charakter řetězové reakce. Takováto elektronová lavina je na obr. 1.



Obr.1 Elektronová lavina^[3]

Při termické ionizaci v uzavřeném prostoru probíhají i další průvodní jevy:

- Štěpení neutrálních částic vzájemnými srážkami
- Fotoionizace zářením ze zahřátých stěn
- Ionizace srážkami elektronů s molekulami plynu
- Rekombinace elektronů a iontů
- Disociace molekul na atomy

2.3. Stupeň ionizace

Procesy ionizace a rekombinace jsou v ustáleném stavu v rovnováze a lze je vyjádřit rovnicí (1):^[6]



N elementární částice v neutrálním stavu
 $e_0 \cdot U_i$ ionizační práce
 e_0 elementární náboj
 N^+ kladně nabitá částice

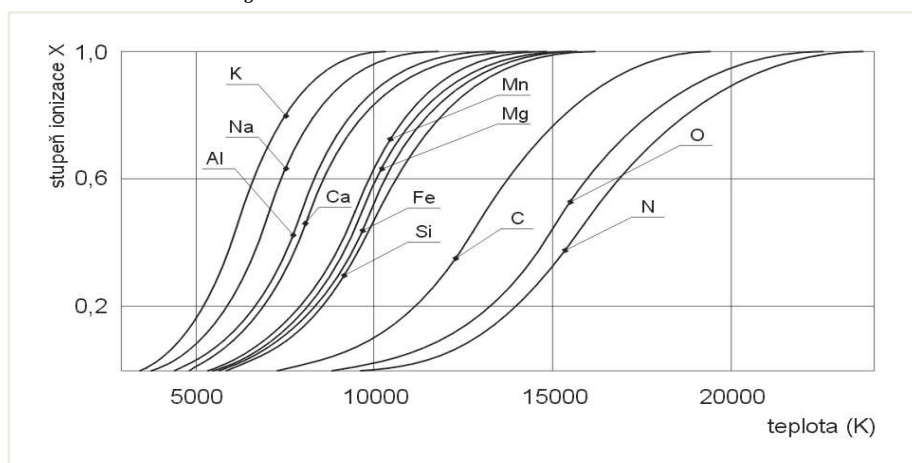
Z tohoto vztahu byl odvozen tzv. *Sahův* vztah (2):^[6]

$$\frac{x^2}{1-x^2} \cdot p = 3,2 \cdot 10^{-2} \cdot T^{2,5} \cdot e^{-\frac{11600 \cdot U_i}{T}} \quad [-; K; V] \quad (2)$$

x stupeň ionizace
 p tlak v plynu
 T teplota prostoru
 U_i ionizační potenciál

Stupněm ionizace rozumíme poměr ionizovaných molekul k celkovému počtu molekul v daném objemu. Tento vztah nicméně nereflektuje kvantové statické váhy molekul g_g a tvořících se iontů g_p . Tyto váhy je zapotřebí brát v úvahu, blíží-li se stupeň ionizace jedné. Při zanedbání kvantových statických vah hrozí v tomto případě značné odchylky ve stanovení stupně ionizace. Proto byl zaveden tzv. *Granovského* vztah (3) pro termickou ionizaci:^[6]

$$\frac{x^2}{1-x^2} \cdot p = 6,53 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{g_p}{g_g} \cdot T^{2,5} \cdot e^{-\frac{11600 \cdot U_i}{T}} \quad (3)$$



Obr. 2 Stupeň ionizace různých prvků v závislosti na proměnných teplotách^[6]

Vliv tlaku se obzvláště projevuje právě u plazmových aplikací, neboť je plyn vháněn do trysek hořáků pod různým tlakem, což významně ovlivňuje stupeň ionizace.

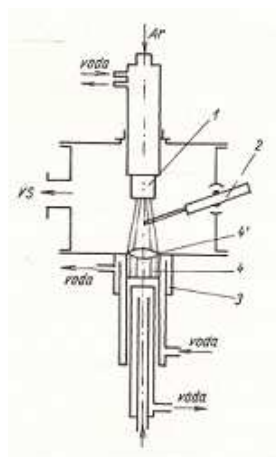
3. Plazmové pece s krystalizátory

Plazmové pece s kovovými vodou chlazenými krystalizátory jsou, na rozdíl od pecí s žáruvzdornou vyzdívkou, schopny zpracovávat najednou menší množství kovu, nicméně s jejich použitím je spojena řada výhod:

- Lze v nich tavit kovy, jejichž bod tání převyšuje pracovní teploty většiny žáruvzdorných materiálů
- Získané materiály vynikají téměř stoprocentní kovovou čistotou bez nežádoucích příměsí
- Tavenina obsahuje nižší procenta plynů
- Výsledné ingoty jsou utvářené přímo v pecním prostoru, bez potřeby jejich odlití v ochranné atmosféře nebo vakuu

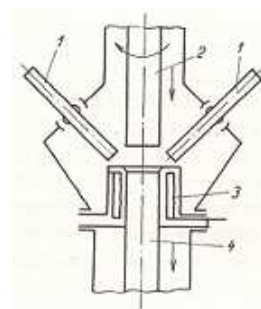
Samotné pece pak mají poměrně malé rozměry a není zde potřeba pravidelné obnovy žáruvzdorné vyzdívky, která má jinak životnost okolo dvou set pracovních cyklů. Nicméně s nemožností tavení velkého objemu materiálu přichází i nutnost, mnohdy nákladné, přípravy vsázky do formy tyčí, granulí atd. Další nevýhodu potom představuje i méně příznivá energetická bilance.

Krystalizátor, tedy pracovní prostor pece, může být proveden buďto v poloze horizontální nebo vertikální. Problémy vertikálního uspořádání tkví nejen v nutnosti předběžné úpravy vsázky, ale také v nerovnoměrnosti chemického složení slitin. Toto pak lze mnohdy řešit pouze několikanásobným přetavováním ingotů, jinak se zvedají náklady ve fázi přípravy vsázky. Proto se také vertikálních krystalizátorů užívá většinou pro přetavování, v důsledku čehož se snižuje podíl nečistot ve výsledném materiálu. Na obr. 3 a obr. 4 uvádím schémata dvou možných provedení vertikálních krystalizátorů.



Obr.3 Vertikální krystalizátor
s jedním hořákem^[3]

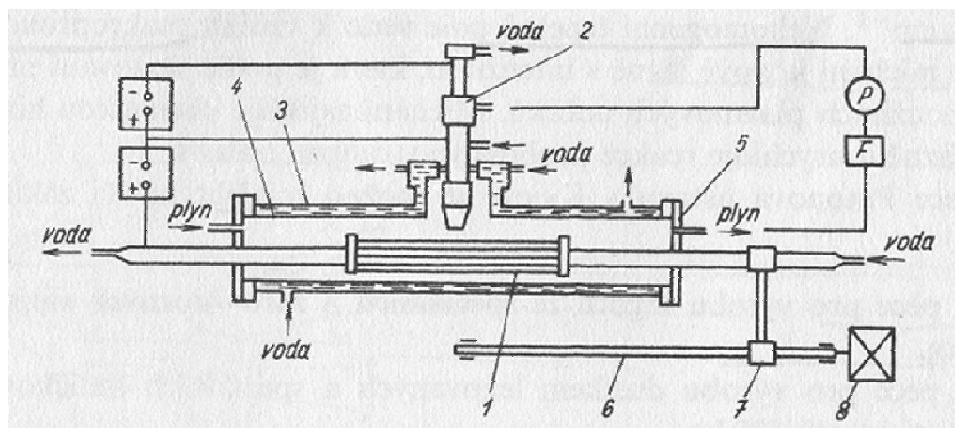
1 – hořák; 2 – boční přísun vsázky; 3 – oblast taveného kovu; 4 – lázeň taveného kovu; Ar – přívod argonu; vs – vakuový systém



Obr.4 Vertikální krystalizátor
s několika hořáky^[3]

1 – hořáky; 2 – vsázka; 3 – těleso krystalizátoru; 4 – osa ingotu

Volbou horizontálního krystalizátoru lze v laboratorních podmínkách tyto problémy odstranit, jelikož můžeme použít materiál s menšími nároky na prvotní úpravu a stejnorodost chemického složení. Tento typ pecí byl vyvinut na půdě Vysoké školy Báňské – Technické univerzity Ostrava a slouží pro výzkum metalurgických procesů při použití nízkoteplotního plazmatu. Schéma takovéto laboratorní plazmové pece je uvedeno na obr. 5. Její fotografie je na obr. 7.

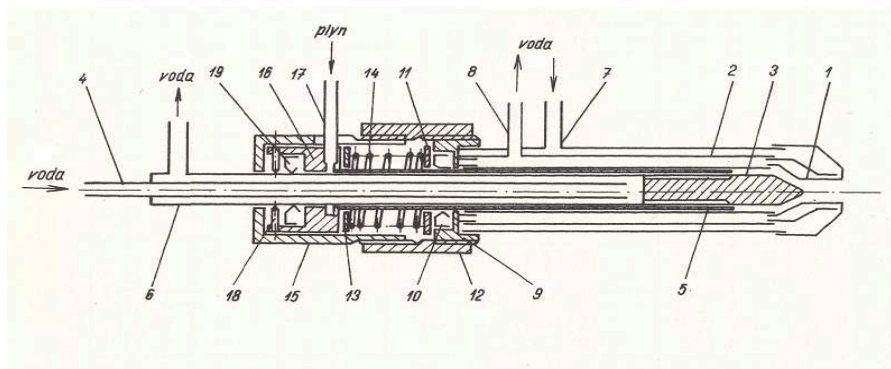


Obr.5 Schéma laboratorní plazmové pece s horizontálním krystalizátorem o výkonu 5-100kW^[3]

1 – krystalizátor; 2 – plazmový hořák; 3 – vnější plášť pece; 4 – vnitřní plášť pece; 5 – víko pece; 6 – pohybový šroub; 7 – unášec; 8 – motor pro posuv krystalizátoru; F – filtr; P – cirkulační čerpadlo

3.1. Obecný rozbor typové plazmové pece

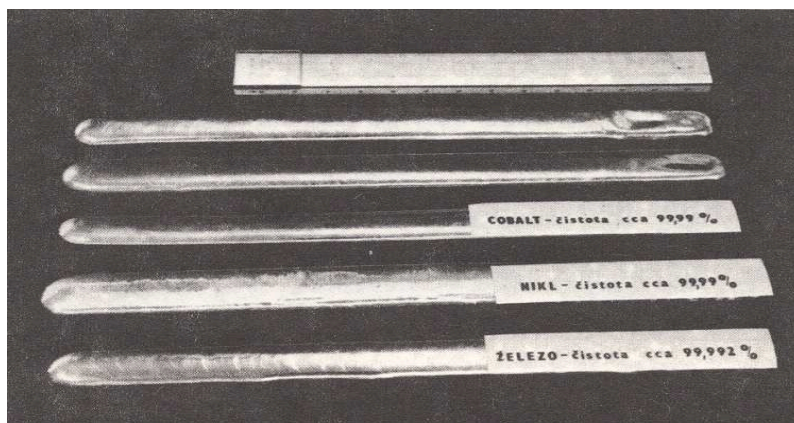
Plazmové pece s horizontálními krystalizátory dovolují zpracovávat materiál o hmotnosti do 1 kg. Zdrojem tepla je zde plazmový hořák, který vyniká vysokou hodnotou koncentrace tepelné energie (viz. Obr. 6). Díky tomu je možné v krystalizátoru vyrábět slitiny a kovy s teplotou tání až 3400° C. Krystalizátor je tvořen měděnou, vodou chlazenou, formou, která má tvar žlabu. Posuvný pohyb formy je řízen transduktorovým regulátorem otáček, a to rychlostí 0,02 – 20 m·h⁻¹.



Obr.6 Schéma plazmového hořáku podle návrhu V. Dembovského^[3]

1 – tryska; 2 – obtoková trubka; 3 – katoda; 4 – přívod chladicí vody ke katodě; 5 – izolátor; 6 – držák katody; 7 – přívod chladicí vody k trysce; 8 – odvod chladicí vody; 9 – spojovací pouzdro; 10 – těsnící kroužek; 11 – izolační podložka; 12 – seřizovací matice; 13 – opěrná podložka; 14 – pružina; 15 – pouzdro; 16 – rozdělovací komora; 17 – přívod plynu; 18 – upevňovací šroub; 19 – těsnící kroužek

Pro posouzení základních fyzikálních vlastností získaných materiálů je třeba použít hořák s tryskou o minimálním průměru 16 mm. Rozměry výsledných ingotů jsou potom cca 400x30x40 mm. Příklady takovýchto ingotů jsou uvedeny na obr. 7.



Obr.7 Příklady ingotů čistých kovů a slitin vyrobené v plazmové peci^[3]

Kvůli vysokým teplotám je třeba tepelně namáhané součásti pece chladit. Toho se dosahuje za pomoci vodního čerpadla, které zvládne přivést do chladicího okruhu za minutu až

120 litrů vody při tlaku 1,1 MPa. Optimální průtok chladicí kapaliny se reguluje podle použitého materiálu vsázky tak, aby nedocházelo k poškození stěn krystalizátoru nebo k přimíchávání mědi do taveného materiálu, a zároveň aby nedocházelo ke zbytečnému odvodu tepla z taveného materiálu.

Aby bylo dosaženo stabilní ionizace ve sloupci plazmatu, je zapotřebí přivádět na plazmový hořák směs plazmotvorných plynů (většinou Ar, He₂ a N₂) přesně daného složení a čistoty. To zajišťuje aparatura pro čištění plazmotvorných plynů. Po přečištění je směs plynů zaváděna do plazmového hořáku a jako odpad zase odváděna. Je také možno použít cirkulačního systému s opětovným přísunem nevyužitého plynu (obr. 5). Cirkulační systém však není vhodný v případě použití takových směsí plynů, které by mohly poškodit součásti hořáku. V takovém případě je na hořák přiváděn (a jako odpad zase odváděn) čistý argon, který hořákem proudí v objemu cca 20 l·min⁻¹.

Přenos tepla na tavený materiál dosahuje, u daného typu pece a krystalizátoru, účinnosti kolem 50%. Jelikož v průběhu tavení nedochází k prakticky žádným ztrátám na objemu taveného materiálu, hodí se tento typ pece k přetavování vzácných a drahých kovů jako jsou Au, Ag a Pt. Díky zachování téměř 100% původního složení, lze získat i velmi složité slitiny požadovaného složení a čistoty. Skutečný vzhled a uspořádání plazmové pece s horizontálním vodou chlazeným krystalizátorem je uvedeno na obr. 8.



Obr.8 Fotografie skutečného uspořádání plazmové pece s horizontálním vodou chlazeným krystalizátorem

1 – plazmový hořák; 2 – aparatura pro čištění plazmotvorných plynů; 3 – panelové indikační a měřicí přístroje; 4 – otvor s poklopem pro přístup do prostoru krystalizátoru; 5 – skříň převodovky; 6 – časovač pro řízení zapalování oblouku; 7 – ovládání a signalizace startovacího automatu; 8 – ovládací panel; 9 – procesní indikátory napětí a proudu; 10 – těleso krystalizátoru; 11 – kukátko pro pozorování dění v peci;

3.2. Základní součásti řešené plazmové pece

Řešená plazmová pec se nachází v prostorách laboratoře J129 na půdě VŠB – TU Ostrava. Její fotografie je na obr. 8. Mezi její základní součásti patří plazmový hořák, s jehož pomocí se dosahuje seškrvení elektrického oblouku, a tím vysoké koncentrace energie. Skládá se z katody a anody. Jeho fotografie je na obr. 9.

Další podstatnou součástí je těleso krystalizátoru, které slouží jako pracovní prostor pece. Uvnitř se nachází unášec vsázky ve tvaru žlábků, který je ovládán pomocí stejnosměrného pohonu, složeného z převodovky, stejnosměrného motoru a z dnes již zastaralého elektronkového ovládání. Motor byl vyroben firmou MEZ Brno n.p. v roce 1965. Jeho štítkové údaje jsou uvedeny v tabulce 2 (kap. 6.3.3.). Fotografie těchto zařízení jsou na obr. 10, 11, 12, 13 a 14.



Obr.9 Fotografie plazmového hořáku



Obr.10 Fotografie horizontálního krystalizátoru pece



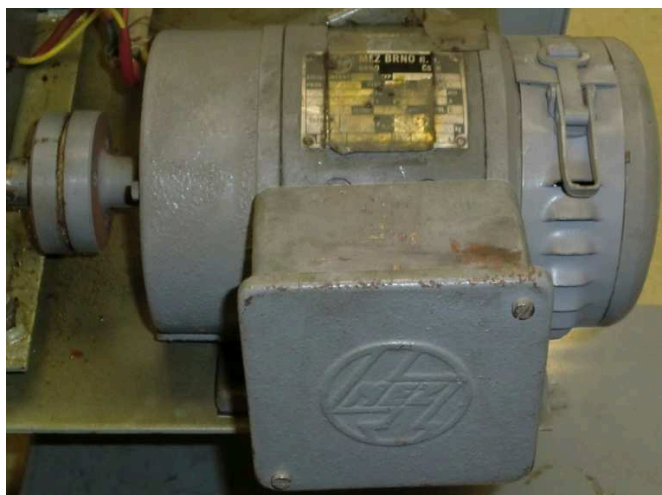
Obr.11 Vnitřek krystalizátoru se žlábkovým unášečem vsázky



Obr.12 Převodovka pohonu krystalizátoru



Obr.13 Ovládací prvky stejnosměrného motoru plazmové pece



Obr.14 Motor pro posuv unášče vsázky krystalizátoru

3.3. Napájení plazmové pece

Napájení celé pecní aparatury je řešeno svářecím usměrňovačem s plně řízeným polovodičovým tyristorovým usměrňovačem ForWEL 1200 GOLEM, který byl vyroben firmou Formica (obr. 15). Zdroj má jmenovitý příkon 64 kVA (3x400 V, 90 A), účinník 0,76, účinnost 82 %, napětí naprázdno 65 V, rozsah regulace výstupního proudu 50 – 1200 A, regulace napětí 10 – 60 V. Rozměry přívodních kabelů jsou dokumentací doporučeny 4 x 10 mm² a svářecího kabelu 2 x 95 mm².^[5]



Obr.15 Napájecí zdroj Formica ForWEL 1200 GOLEM^[5]

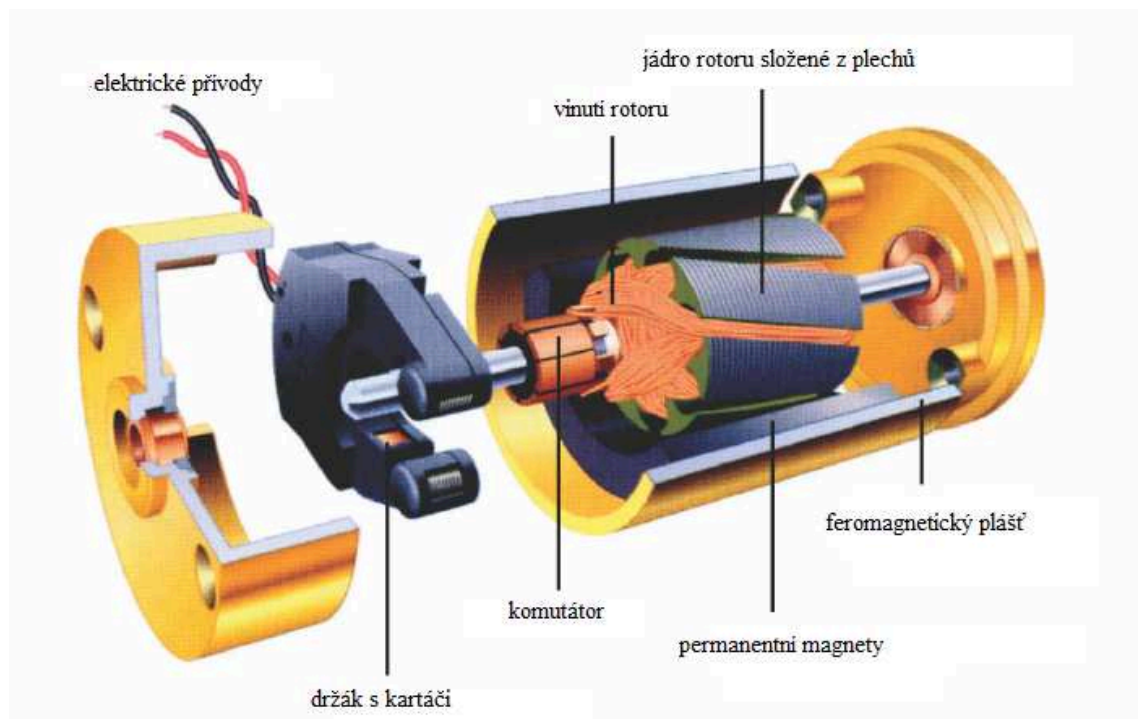
4. Stejnosměrné motory

4.1. Princip funkce stejnosměrného motoru

Stejnosměrné motory jsou založeny, jako všechny elektrické stroje, na principu elektromagnetické indukce. Budící vinutí, umístěné na statoru, vytváří magnetické pole. V tomto poli se pak otáčí rotor s vinutím ve formě cívek rozložených po obvodu rotoru. Konce cívek jsou vyvedeny na lamely komutátoru, ke kterým přiléhají kartáče. Ty jsou pak přímo spojeny s přívody elektrické energie. Pokud je těmito přívody napájeno vinutí rotoru stejnosměrným proudem, působí na vodiče rotoru síla podle následujícího vztahu (4):

$$F = B \cdot i \cdot l \quad [N; T; A; m] \quad (4)$$

Díky působení komutátoru jsou polarity proudů ve vodičích rotoru stále stejné (ve stejné prostorové poloze, nikoliv ve stejné cívce), magnetické pole působí stále ve stejném směru a rotor se otáčí. Konstrukce stejnosměrného motoru je uvedena na obr. 16. Díky tomu, že směr působení magnetického toku je kolmý na směr proudu protékajícího kotvou, působí motor vždy s maximálním momentem (u střídavých strojů by se toho muselo složitě dosahovat).



Obr.16 Řez stejnosměrným motorem s vinutím statoru tvořeným permanentními magnety^[7]

4.2. Stejnoseměrné vinutí

Vinutí je uloženo po obvodu rotoru v drážkách a skládá se z vodičů, jejichž počet a rozměry se volí podle protékajícího proudu a napětí a podle následujících základních parametrů stroje:

- Počtu pólových dvojic p
- Počtu dvojic paralelních větví a
- Pólové rozteče τ_p

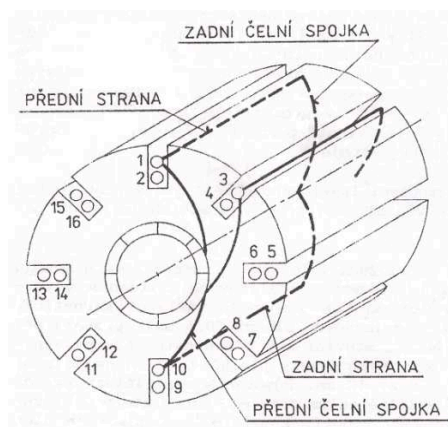
Pólovou roztečí je myšlena vzdálenost dvou sousedících pólů, která se měří po obvodu rotoru, jehož průměr má rozměr D . Pólová rozteč je dána vztahem (5):

$$\tau_p = \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot p} \quad [\text{mm; mm; -}] \quad (5)$$

Moment motoru je největší pokud mají cívky vinutí délku zadního kroku y_1 shodnou s pólovou roztečí. V takovém případě hovoříme o tzv. plném kroku vinutí. Z důvodu zlepšení komutace se však krok vinutí často zkracuje, výjimečně prodlužuje. Pak mluvíme o zkráceném, případně prodlouženém kroku. Zadním krokem cívky vyjadřujeme vzdálenost přední a zadní strany cívky udávanou v počtu drážek. Pro představu uvádím na obr. 17 schematické znázornění zadního kroku cívky. Jelikož má pólová rozteč a krok vinutí rozdílné jednotky, zavádíme v praxi údaj o počtu drážek na pólovou rozteč Q_p (6).

$$Q_p = \frac{Q}{2 \cdot p} \quad [-] \quad (6)$$

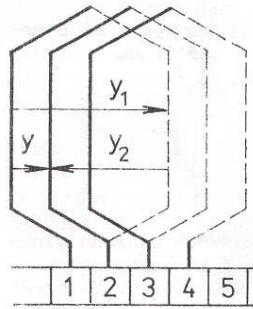
- Q_p počet drážek na pólovou rozteč
 Q celkový počet drážek rotoru
 p počet pólových dvojic



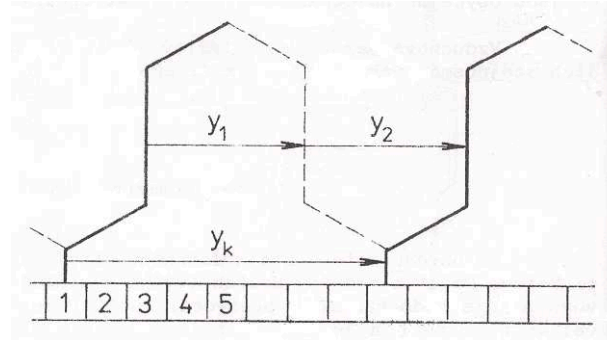
Obr.17 Schematické znázornění zadního kroku cívky^[2]

Vinutí může být smyčkové nebo vlnové, jednovrstvé a dvouvrstvé. Většinou se používá dvouvrstvé vinutí, které má počet cívek stejný jako počet drážek. Jednovrstvé vinutí se používá

pouze pro stroje na nízké napětí, jako jsou např. automobilové startéry. Schémata smyčkového a vlnového vinutí jsou na obr. 18 a 19.



Obr.18 Smyčkové vinutí^[2]



Obr.19 Vlnové vinutí^[2]

4.3. Magnetický obvod

Magnetickým obvodem stejnosměrného stroje se uzavírá hlavní magnetický tok, který vytváří budící vinutí. Magnetomotorické napětí tohoto vinutí (7) je součtem magnetických napětí V_i jednotlivých částí magnetického obvodu, kterými jsou:

- vzduchové mezery s intenzitou magnetického pole H_δ
- zuby rotoru H_z
- magnetický obvod rotoru H_{jr}
- dvojice hlavních pólů a pólových nástavců H_p
- magnetický obvod statoru H_{js}

$$F_m = \oint H_s ds = \sum_{i=1}^m V_i = 2 \int_a^b H_\delta ds + 2 \int_b^c H_z ds + \int_c^d H_{jr} ds + 2 \int_f^g H_p ds + \int_g^h H_{js} ds \quad (7)$$

Při konstantních intenzitách magnetických polí v jednotlivých částech magnetického obvodu pak bude mít rovnice (7) tvar:

$$F_m = 2N_f \cdot I_f = H_\delta \cdot 2\delta + H_z \cdot 2l_z + H_{jr} \cdot l_{jr} + H_p \cdot 2l_p + H_{js} \cdot l_{js} \quad (8)$$

N_f počet závitů jednoho pólu

Abychom mohli stanovit jednotlivé intenzity magnetického pole, musíme pro každou část magnetického obvodu znát její magnetickou indukci B . Ta se vypočítá, pomocí magnetického toku a rozměrů jednotlivých částí magnetického obvodu, podle vztahu (9).

$$B = \frac{\Phi}{S} \quad [T; \text{Wb}; \text{m}^2] \quad (9)$$

Těmto indukci pak přiřadíme příslušnou intenzitu podle magnetizačních charakteristik jednotlivých materiálů částí magnetického obvodu. Závislost magnetomotorického napětí F_m a

magnetického toku Φ je známa jako magnetizační charakteristika stejnosměrného stroje (obr. 20).

Magnetické napětí vzduchové mezery bývá většinou nejvýznamnější součástí magnetomotorického napětí. Poměr celkového magnetomotorického napětí a magnetického napětí vzduchové mezery se nazývá mírou sycení ν (10).

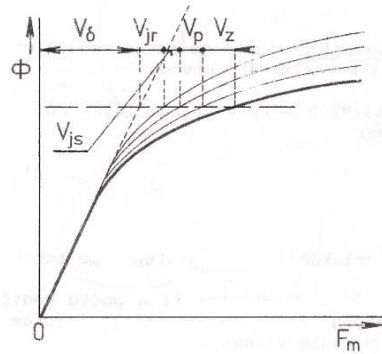
$$\nu = \frac{F_m}{V_\delta} \quad (10)$$

Pokud zanedbáme všechna magnetická napětí vůči magnetickému napětí vzduchové mezery, pak dostáváme výraz (11):

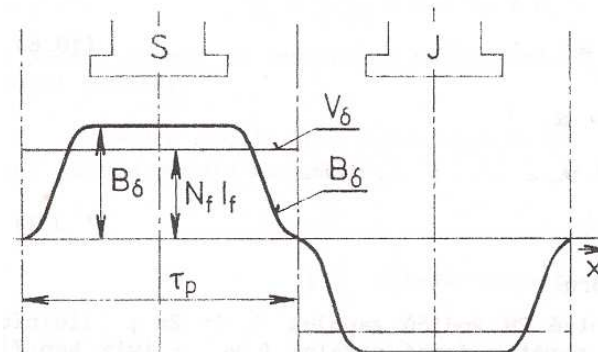
$$F_m = 2N_f \cdot I_f = H_\delta \cdot 2\delta = \frac{B_\delta}{\mu_0} \cdot 2\delta \quad (11)$$

Odtud pak můžeme získat vztah pro magnetické napětí jedné vzduchové mezery (12).

$$N_f \cdot I_f = \frac{B_\delta}{\mu_0} \cdot \delta \quad [A; T; H/m; m] \quad (12)$$



Obr.20 Magnetizační charakteristika stejnosměrného stroje ^[2]



Obr.21 Průběh magnetického pole ve vzduchové mezeře ^[2]

Vzorce v této kapitole byly převzaty z literárních pramenů [1] a [2].

4.4. Indukované napětí

Ve vodiči vinutí se indukují napětí:

$$U_{iv} = B_x \cdot l_i \cdot v \quad [V; T; m; m/s] \quad (13)$$

B_x magnetická indukce v místě x na obvodu rotoru
 l_i aktivní délka vodiče
 v rychlost vodiče, resp. obvodová rychlost rotoru

Průběh indukce v místě x nahradíme obdélníkovým průběhem s obsahem plochy rovným obecnému průběhu. Potom bude platit následující rovnice (14), kde za τ_p dosadíme podle vztahu (5):

$$B = \frac{\Phi}{l_i \cdot \tau_p} = \frac{\Phi}{l_i} \cdot \frac{2 \cdot p}{\pi \cdot D} \quad [T; Wb; m; mm] \quad (14)$$

$$v = \omega \cdot \frac{D}{2} = 2\pi \cdot \frac{n}{60} \cdot \frac{D}{2} \quad [m/s; rad/s; mm; min^{-1}] \quad (15)$$

ω úhlová rychlost rotoru
 n otáčky motoru
 D průměr rotoru
 Φ magnetický tok
 τ_p pólová rozteč

Při předpokládaném obdélníkovém průběhu indukce jsou indukovaná napětí ve všech vodičích stejná a celkové indukované napětí stroje (16) získáme násobením napětí jednoho vodiče počtem vodičů jedné paralelní větve vinutí a dosazením rovnic (14) a (15) do vztahu (13).^[2]

$$U_i = \frac{\Phi}{l_i} \cdot \frac{2 \cdot p}{\pi \cdot D} \cdot l_i \cdot 2\pi \cdot \frac{n}{60} \cdot \frac{D}{2} \cdot \frac{2N}{2a} = \frac{p \cdot 2N}{60 \cdot a} \cdot \Phi \cdot n \quad [V; Wb; min^{-1}] \quad (16)$$

$$k_E = \frac{p \cdot 2N}{60 \cdot a} \quad (17)$$

$\frac{2N}{2a}$ počet vodičů jedné paralelní větve vinutí
 k_E konstanta úměrnosti

Z výše uvedených rovnic je patrné, že indukované napětí je závislé na změně rychlosti otáčení a změně smyslu magnetického toku.^[2]

4.5. Elektromagnetický moment

Jak už bylo řečeno, je síla působící na vodič protékaný proudem v magnetickém poli rovna vztahu (4). Na každý takovýto vodič (v případě obdélníkového průběhu magnetické indukce) pak působí indukce (18), kde I_v je proud jednou paralelní větví podle rovnice (19) pro celkový proud kotvy.

$$M_{iv} = F_{iv} \cdot \frac{D}{2} = B \cdot I_v \cdot l_i \cdot \frac{D}{2} \quad [\text{Nm; T; A; m}] \quad (18)$$

$$I = 2a \cdot I_v \quad [\text{A; -; A}] \quad (19)$$

Abychom získali elektromagnetický moment pro celý stroj, musíme moment pro jeden vodič (18) vynásobit celkovým počtem vodičů $2N$. Pokud dále do této rovnice (18) dosadíme z rovnice (14) a (19) dostáváme tvar (20) pro celkový elektromagnetický moment stroje:

$$M_t = M_{iv} \cdot 2N = \frac{\Phi}{l_i} \cdot \frac{2 \cdot p}{\pi \cdot D} \cdot \frac{I}{2a} \cdot l_i \cdot \frac{D}{2} \cdot 2N = \frac{p \cdot N}{a \cdot \pi} \cdot \Phi \cdot I \quad [\text{Nm; Wb; A}] \quad (20)$$

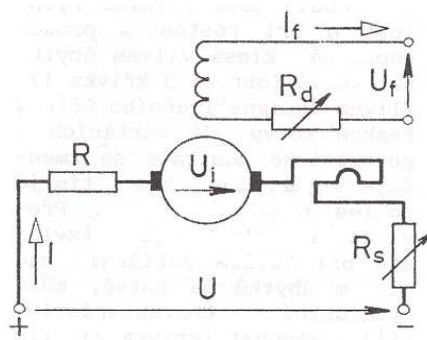
$$k = \frac{p \cdot N}{a \cdot \pi} \quad (21)$$

k konstanta úměrnosti

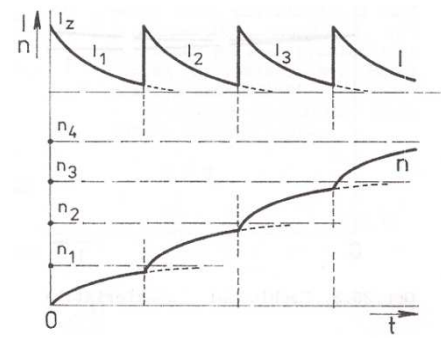
Jak je vidět, změny momentu (smyslu otáčení rotoru) můžeme docílit změnou smyslu magnetického toku nebo obrácenou polaritou elektrického proudu. ^[2]

4.6. Motor s cizím buzením

Budící vinutí je napájeno stejnosměrným napětím U_f , jehož velikost je totožná se jmenovitým napětím kotvy U_n . Díky tomu lze připojit paralelně ke kotvě buzení. Dále je budící vinutí složeno z velkého počtu závitů při malém průřezu vodičů. Proto má vinutí poměrně velkou impedanci (řádově $10 - 10^2 \Omega$) a budící proud I_f je zlomkem jmenovitého proudu kotvy I_n . V budícím vinutí se při vypínání buzení indukuje vysoké napětí, které může ohrozit jeho izolaci. Proto se k budícímu vinutí připojuje paralelní odpor o několika $k\Omega$ nebo se vinutí úplně odpojuje od zdroje při maximálním regulačním odporu R_d , čímž se dosáhne omezení budícího proudu I_f . Aby se předešlo velkým ztrátám (úbytky napětí a Jouleovy ztráty) ve vinutí kotvy, konstruuje se vinutí kotvy s co nejmenším odporem R . ^[2]



Obr.22 Zapojení cize buzeného motoru ^[2]



Obr.23 Průběh proudu a otáček při spouštění cize buzeného motoru ^[2]

4.6.1. Spouštění

Spouštíme-li stejnosměrný motor s cizím buzením, je zapotřebí, aby byl motor plně nabuzen kvůli dosažení velkého záběrného momentu. Kotvou totiž v tomto stavu protéká menší proud (20). Kotvu připojíme na zdroj přes spouštěcí odpor R_s (obr. 22), z důvodu krátkodobého posílení odporu kotvy R a omezení záběrného proudu podle vztahu (22). Bez spouštěcího odporu můžeme motor rozbíhat také zvyšováním napětí U na kotvě.

$$I_k = \frac{U - U_i}{R + R_s} \quad [\text{A}; \text{V}; \Omega] \quad (22)$$

V okamžiku kdy kotva stojí, je indukované napětí nulové. Jakmile se však rotor začne otáčet, indukované napětí se postupně zvyšuje. Zvyšují se i otáčky, proud a moment klesá. Po ustálení je moment v rovnováze s momentem zátěže a momentem ztrát naprázdno. Při postupném odstraňování spouštěcího odporu roste dále indukované napětí. Proud a rychlost otáčení se pak mění podle obr. 23. Společně s nárůstem proudu narůstá i moment podle momentové charakteristiky (obr. 26). To pokračuje až do jmenovitých hodnot stroje.

4.6.2. Chod naprázdno

Při chodu naprázdno je proud kotvou vůči jmenovitému proudu velmi malý, mechanický moment je roven nule a veškerý příkon jde do ztrát (mechanických a v železe).

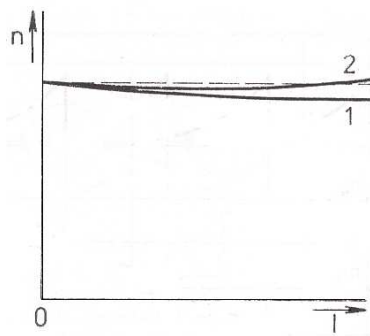
$$P_{p0} \cong \Delta P_m + \Delta P_{Fe} \quad [\text{W}] \quad (23)$$

4.6.3. Zatěžování

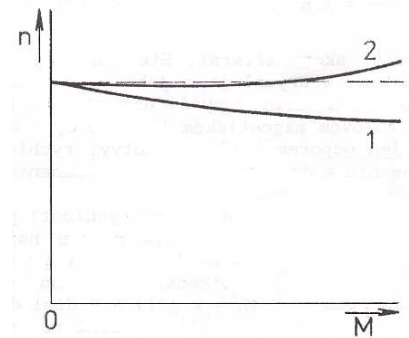
Při zátěži je na hřídeli odebírán mechanický výkon podle vztahu:

$$P = M \cdot \omega_m \quad [\text{W}; \text{Nm}; \text{min}^{-1}] \quad (24)$$

Chování motoru při zatížení znázorňují jeho zatěžovací charakteristiky (mechanická a rychlostní). Mechanické zatížení dále ovlivňuje také příkon a proud motoru.



Obr.24 Rychlostní zatěžovací charakteristika ^[2]



Obr.25 Mechanická zatěžovací charakteristika ^[2]

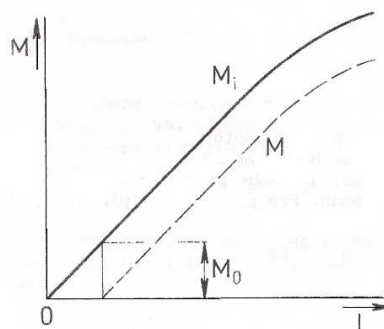
Na rychlostní charakteristice (obr. 24 křivka 1) je vidět pokles otáček při zvyšujícím se proudu. To je způsobeno úbytkem napětí na kotvě, nicméně pokles magnetického toku, způsobený reakcí kotvy, snižování rychlosti poněkud vyrovnává (25). Pokud pokles toku převyší úbytek napětí na kotvě, pak otáčky začnou dokonce stoupat (obr. 24 křivka 2).

$$n = \frac{U - R \cdot I}{k_E \cdot \Phi} \quad [\text{min}^{-1}; \text{V}; \Omega; \text{A}; \text{Wb}] \quad (25)$$

k_E konstanta úměrnosti viz. (17)

Mechanická charakteristika (obr. 25) je skoro stejná proto, že moment je přibližně úměrný proudu podle vztahu (20). Zde preferujeme křivku 1, která představuje stabilnější chod motoru. U křivky dvě nestoupá zatěžovací (brzdící) moment dost rychle, místo toho roste rychlost otáčení a hrozí prokluz motoru, po kterém může dojít k poklesu otáček a zastavení motoru.

Další neméně důležitou charakteristikou motoru s cizím buzením je jeho momentová charakteristika (obr. 26). Zde vidíme, že mechanický moment na hřídeli je menší než elektromagnetický moment. To je dáno ztrátami naprázdno, kdy je mechanický moment nulový (viz kap. 4.6.2.).



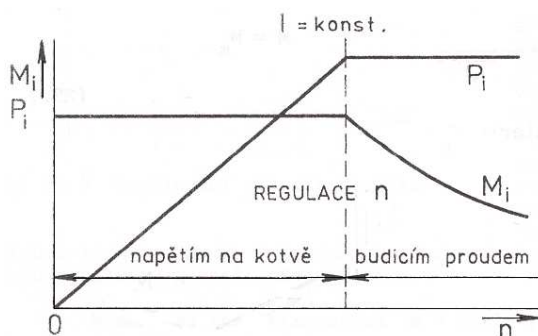
Obr.26 Momentová charakteristika ^[2]

4.6.4. Řízení rychlosti

Podle vztahu (25) můžeme rychlost řídit buďto napětím na kotvě U nebo změnou budícího proudu I_f (což odpovídá změně magnetického toku Φ). Při zmenšení magnetického toku nejprve stoupne proud kotvy (při 20 % zmenšení toku stoupne proud kotvou skoro 3x) a tím se zvedne i moment (20). Otáčky se okamžitě nezvedají, protože působí setrvačné síly. Díky poklesu toku se však motor začne brzy urychlovat a proud následně klesá (25). Budící vinutí zde nesmíme odpojit, aby se otáčky nezvedly nad nebezpečnou hodnotu. Regulace rychlosti pomocí budícího proudu je poměrně snadnou, neboť stačí měnit hodnotu regulačního odporu, ale motor není zcela magneticky využit. Je zde konstantní vnitřní výkon P_i (při konstantním I) (26).

Regulace rychlosti změnou napětí na kotvě je regulací při konstantním vnitřním momentu lineárně rostoucím vnitřním výkonu (opět při konstantním I). Otáčky se zde zvyšují podle vztahu (16) a výkon podle vztahu (26). Motor je zde plně elektricky a magneticky využit, ale je třeba mít regulovatelný zdroj napětí.

$$P_i = M_i \cdot \omega_m = k \cdot \Phi \cdot I \cdot \frac{U_i}{k \cdot \Phi} = U_i \cdot I = \text{konst.} \quad [\text{W}; \text{Nm}; \text{rad}; \text{Wb}; \text{A}; \text{V}] \quad (26)$$



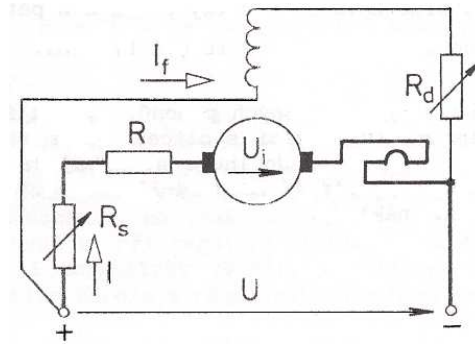
Obr.27 Regulace rychlosti při $I=\text{konst.}$ ^[2]

4.6.5. Využití

Díky snadné, široké a plynulé regulace rychlosti se motory s cizím buzením využívají především u regulačních pohonů ve spojení s řízenými usměrňovači.

4.7. Motor s paralelním buzením

Při spouštění musí být budící vinutí připojeno přímo na napájecí napětí (nikoliv na svorky kotvy), aby bylo možné motor plně nabudit. Průběh spouštění je shodný s cize buzeným motorem (kap. 4.6.1.), ale lze použít spouštění pouze pomocí spouštěcího odporu. Rychlost otáčení nelze regulovat napětím na kotvě, neboť by se měnil i budící proud. Rychlost řídíme pouze změnou budícího proudu nebo odporem v obvodu kotvy (ztrátové). Regulovat lze sice plynule a snadno, ale pouze v malém rozsahu otáček. ^[2]



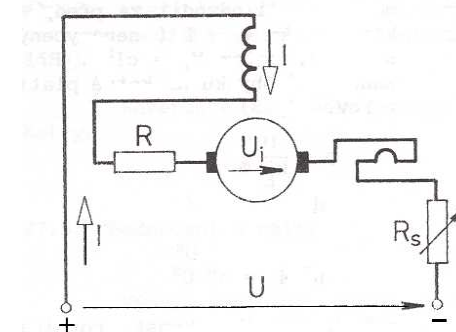
Obr.28 Zapojení paralelně buzeného motoru ^[2]

4.7.1. Využití

Vzhledem k malému rozsahu regulace rychlosti, se motor používá pro aplikace, kde není zapotřebí, aby motor běžel v různých rychlostních režimech.

4.8. Motor se sériovým buzením

Motor se sériovým buzením má budící vinutí zapojeno do série s kotvou, co znamená, že budící proud je zároveň proudem kotvy.



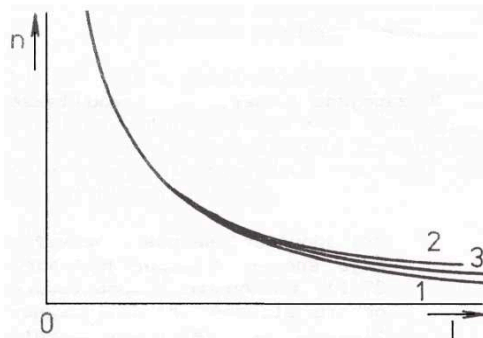
Obr.29 Zapojení sériově buzeného motoru ^[2]

4.8.1. Spouštění

Motor se opět spouští z plně nabuzeného stavu za postupného snižování spouštěcího odporu R_s . Po úplném odpojení odporu stoupne ve stroji proud a magnetický tok, tím se zvětší moment (20), motor začne zvyšovat otáčky, tím i indukované napětí, proud klesá. Motor se sériovým buzením se však nesmí spouštět bez zatížení a není možné ho odlehčit (malé nebo žádné zatížení znamená malý odebíraný proud), jelikož by došlo k odbuzení a k možnému nárůstu rychlosti na nebezpečnou hranici.

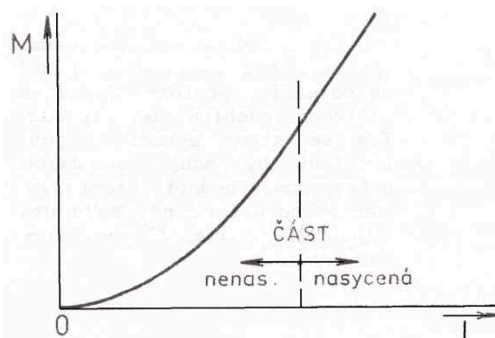
4.8.2. Zatěžování

Podíváme-li se na rychlostní charakteristiku sériově buzeného motoru (obr. 30), vycházející opět ze vztahu (25), pak při zanedbání ztrát RI v obvodu kotvy, můžeme vidět, že křivka 1 je rovnosou hyperbolou. To značí, že magnetický tok a proud rostou stejnoměrně. Při velkých proudech dochází k tomu (vlivem nasycení materiálu), že proud roste rychleji než magnetický tok a rychlost je vyšší (obr. 30 křivka 2). Pokud však budeme ztráty v kotvě respektovat, otáčky se při velkém proudovém zatížení náhle rapidně zmenšují (obr. 30 křivka 3). Také je zřejmé, že při nulovém zatížení (odlehčení, odstranění zátěže), by otáčky prudce vzrostly, což by mohlo vyústit v poškození motoru (kap. 4.8.1.).



Obr.30 Rychlostní charakteristika sériově buzeného motoru ^[2]

U momentové charakteristiky lze opět pozorovat, že pro nenasyčený stav roste tok i proud stejnoměrně (charakteristika je parabola), avšak při nasycení už tok prakticky neroste a z charakteristiky se stává přímka (obr. 31).



Obr.31 Momentová charakteristika sériově buzeného motoru ^[2]

Na mechanické charakteristice vidíme, že při sníženém napětí na $U/2$ je rychlost poloviční (při stejném momentu) a moment čtvrtinový (při stejné rychlosti). ^[2]

4.8.3. Řízení rychlosti

Rychlost motoru se reguluje podobně jako u cize buzeného motoru napětím na kotvě (napětím zdroje) nebo budícím proudem (ovlivňujeme hodnotu spouštěcího odporu). Rychlost lze také řídit paralelním připojením impedance (tlumivky) k budícímu vinutí.

4.8.4. Využití

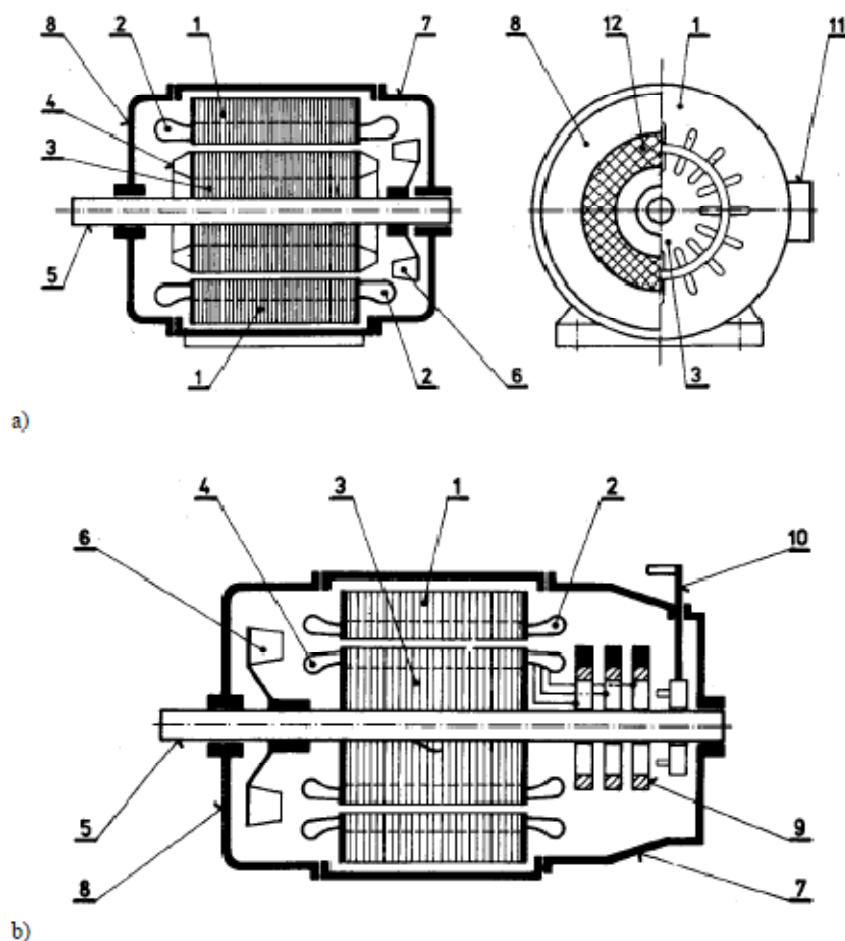
Díky tomu, že při velkém zatížení klesají otáčky stroje, a taky díky současnému nárůstu budícího a kotevního proudu (a tím rychlejšímu nárůstu momentu v závislosti na proudu než u cize buzeného motoru), našel motor se sériovým buzením uplatnění v takových aplikacích, jako jsou lokomotivy, jeřáby, tramvaje a další.

4.9. Motor s kompaundním buzením

Spojuje výhody paralelního a sériového motoru. Sériové buzení zesiluje tok paralelního, čímž se rychlost zmenšuje v závislosti na zatížení. Při odlehčení motoru zapůsobí paralelní vinutí a nedovolí nebezpečnému nárůstu rychlosti. Toky obou vinutí nepůsobí proti sobě. V takovém případě by totiž rychlost se zatížením rostla vlivem poklesu celkového magnetického momentu (25).

5. Asynchronní stroje

Abychom získali přehled o jednotlivých konstrukčních částech asynchronního motoru, zobrazuje příloha P01 pohled na asynchronní motor s kotvou nakrátko v rozloženém stavu. Na obr. 32 je potom řez asynchronním motorem s oběma druhy kotvy.



Obr.32 Podélný a příčný řez asynchronním motorem s kotvou^[4]

a) nakrátko

b) kroužkovou

1 – stator, 2 – statorové vinutí, 3 – rotor, 4 – rotorové vinutí, 5 – hřídel, 6 – ventilátor, 7 – přední štít, 8 – zadní štít, 9 – kroužky a kartáče, 10 – spojovač kroužků nakrátko a odklápěč, 11 – svorkovnice, 12 – chladicí otvory

Máme tedy dva typy motorů – s kotvou nakrátko a kotvou kroužkovou. U motorů s kotvou nakrátko jsou v drážkách rotoru uloženy vodivé tyče, spojené na čelních stranách kruhy nakrátko. Naopak u motorů s kotvou kroužkovou je v drážkách rotoru trojfázové vinutí spojené do hvězdy, jehož vývody jsou připojeny na tři kroužky nalisované, stejně jako magnetický obvod rotoru, na hřídeli stroje, a ke kterým přiléhají pevně osazené kartáče umožňující vyvedení vinutí na svorkovnici stroje.

5.1. Princip funkce

Rotor asynchronního stroje není elektricky spojen se statorem. Výkon se do rotoru přenáší elektromagnetickou indukcí a odtud je také často používán název indukční stroj. Princip asynchronního stroje je tedy založen na vzájemném elektromagnetickém působení točivého magnetického pole statoru a proudů vyvolaných ve vinutí rotoru tímto polem. Vzduchová mezera mezi statorem a rotorem je pak co nejmenší, aby magnetická vazba byla co nejlepší.

Pokles otáček při zatížení je malý a je závislý na velikosti zatížení. Pokles otáček se nejčastěji udává jako skluz s , přičemž

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (27)$$

n_s jsou synchronní otáčky točivého magnetického pole statoru [min^{-1}]

n jsou jmenovité otáčky rotoru

5.2. Konstrukční provedení

Asynchronní stroje mají dvě podstatné části - stator a rotor. Stator má vinutí uložené v drážkách a připojené k síti. Podle provedení rotorového (kotevního) vinutí pak rozeznáváme motory s kotvou nakrátko a s kotvou kroužkovou. U motorů s kotvou nakrátko je rotorové vinutí provedeno z tyčí uložených v drážkách, přičemž všechny tyče jsou na obou koncích spojeny nakrátko. Motory s kotvou kroužkovou mají rotorové vinutí v podstatě stejné jako statorové vinutí uložené v drážkách a jeho vývody jsou připojeny ke kroužkům na hřídeli.

Po kroužcích kloužou kartáče, které jsou na nich buď trvale, nebo pouze při rozběhu motoru, a pak se vinutí spojí tzv. zkratovačem nakrátko a kartáče se nadzvednou nad kroužky. Ke kartáčům se připojuje zařízení na úpravu vlastností stroje (velikosti rozběhového proudu, momentu, otáček), a to buď pouze po dobu rozběhu, nebo trvale při provozu.

Magnetický obvod asynchronního stroje je složen z plechů z elektrotechnické oceli obvykle o tloušťce 0,5 mm. Rotor je hladký a vzduchová mezera je rovnoměrná. Velikost vzduchové mezery je závislá na výkonu motoru a je u malých strojů několik desetin mm, kdežto u velkých strojů i několik mm. Konce a začátky fází statorového vinutí jsou připojeny ke svorkovnici. Vinutí tak může být spojeno do hvězdy nebo do trojúhelníku. Pro vysoké výkony se však používá výhradně zapojení do trojúhelníku.

5.3. Spouštění asynchronních motorů s kotvou nakrátko

Podstatnou nevýhodou asynchronních motorů s kotvou nakrátko je velký proudový a momentový ráz při jejich spouštění. Z tohoto důvodu je třeba při spouštění těchto motorů učinit taková opatření, která zmenší vliv spouštění jednak na napájecí síť, jednak na vlastní motor a jím poháněné zařízení. Zařízení, která dokáží splnit tento požadavek, jsou buď spouštěcí prvky, které se nacházejí vně elektromotoru (podobně jako u motorů s kotvou kroužkovou – spouštěče), nebo je konstrukce elektromotoru tak uzpůsobena, že zajistí jeho rozběh s požadovanými parametry neovlivňujícími napájecí síť ani poháněný stroj (motor se speciálním vinutím rotoru). V zásadě tedy existují následující možnosti spouštění:

- Přímé připojení na napájecí síť
- Se sníženým napětím
- Přepínačem hvězda trojúhelník
- Se speciálním vinutím rotoru
- Střídavým měničem napětí

5.3.1. Přímé připojení na napájecí síť

Používá se pro motory, které nemají při spouštění větší ráz nad 22 kVA, takže v zásadě hovoříme o motorech do 3 kW výkonu. Takovéto motory lze připojit na síť nízkého napětí bez zvláštního spouštěcího zařízení.

Přímo na síť se však dají připojit i motory větších výkonů. Zde však musí být splněna podmínka zvláště dobré přenosové schopnosti sítě. Úbytek napětí, způsobený krajním spouštěcím proudem, zde nesmí překročit 10 % ve dne, 5 % ve špičkách a 15 % v noci.

5.3.2. Spouštění se sníženým napětím

Tento způsob je použitelný u motorů, u nichž se při spouštění nepožaduje plný záběrný moment motoru. Záběrný moment (a s tím související momentová charakteristika) je funkcí čtverce napětí.

$$M_{ks} = M_k \left(\frac{U_{1s}}{U_{1n}} \right)^2 = M_k \left(\frac{I_{1s}}{I_{1k}} \right)^2 \quad [\text{Nm; V; A}] \quad (28)$$

U_{1s} snížené napětí při spouštění

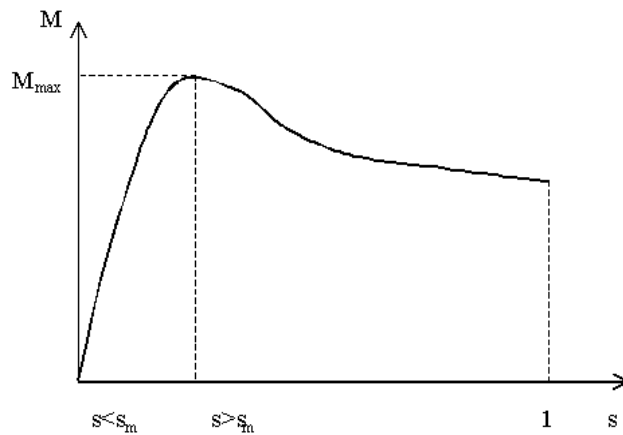
U_{1n} jmenovité napětí

I_{1s} záběrný proud při snížení napětí

I_{1k} záběrný proud při jmenovitém napětí

Snížení napětí motoru lze docílit:

- Předřazením rezistoru statorovému vinutí
- Spouštěcím transformátorem
- Přepojením statorového vinutí nejdříve do hvězdy, a pak do trojúhelníku



Obr.33 Momentová charakteristika asynchronního motoru ^[4]

5.3.3. Spouštění přepínačem hvězda trojúhelník

Velmi rozšířený způsob, který se používá především u malých a středních motorů. Výkonově se pohybujeme v oblasti cca 15-20 kW. Pro jmenovité provozní napětí musejí být motory zapojeny do trojúhelníku. Na svorkovnici je pak vyvedeno šest konců vinutí. Při spouštění je vinutí zapojeno do hvězdy a fázové napětí se zmenší $\sqrt{3}$ krát, takže dostaneme:

$$U_f = \frac{U_s}{\sqrt{3}} \quad [\text{V}] \quad (29)$$

a fázový proud

$$I_{fy} = I_{sy} = \frac{U_s}{Z_f \cdot \sqrt{3}} \quad [\text{A}; \text{V}; \Omega] \quad (30)$$

Z_f impedance jedné fáze

Při spojení do trojúhelníku je záběrný proud jedné fáze

$$I_{fd} = \frac{U_s}{Z_f} \quad [\text{A}; \text{V}; \Omega] \quad (31)$$

Sdružený proud sítě

$$I_{sd} = \sqrt{3} \frac{U_s}{Z_f} \quad [\text{A}; \text{V}; \Omega] \quad (32)$$

Poměr proudů je

$$\frac{I_{sy}}{I_{sd}} = \frac{U_s \cdot Z_f}{3Z_f \cdot U_s} = \frac{1}{3} \quad [A; V; \Omega] \quad (33)$$

Záběrný proud se tedy sníží na jednu třetinu, zatímco fázové napětí je poníženo jen o odmocninu ze tří. Záběrný moment se chová stejně jako proud – sníží se na jednu třetinu. Proudový náraz však může nastat i po přepnutí z hvězdy do trojúhelníku, a to při nevhodném okamžiku přepínání.

5.3.4. Spouštění motorů se speciálním vinutím rotoru

Je používáno zejména z toho důvodu, že se ukázalo jako účelné měnit odpor rotorového obvodu v průběhu spouštění. Rotorová vinutí jsou však konstruována tak, aby po dobu rozběhu dokázala měnit nejen svůj odpor, nýbrž i svou reaktanci. Ke zlepšení rozběhových vlastností existují dva typy speciálních rotorových vinutí.

- S odporovou kotvou
- S vírovou kotvou

U odporových vinutí se odpor zvětšuje použitím odporových materiálů na tyče rotorové klece, nebo i rozřezáním spojovacích kruhů klece. Z důvodu odlišnosti momentové charakteristiky (není tak strmá v pracovní části) kolísají otáčky motoru s odporovou klecí více než u normálních strojů.

Jinak je tomu u motorů s kotvou vírovou. Zde můžeme najít úzké a hluboké drážky, jejichž význam spočívá v tom, že v první fázi rozběhu, kdy se rotorová frekvence rovná frekvenci statorové, vznikají v tyčích značné vířivé proudy, vyvolané rozptylovým polem, procházejícím drážkami rotoru. Spodní část tyče je spojena s největším a horní část s nejmenším rozptylovým tokem. V dolní části tyče se indukuje velké napětí působící proti průchodu proudu v tyči a v horní části tyče se naopak indukuje malé napětí. V důsledku se potom proud nerozloží rovnoměrně po průřezu tyče, nýbrž je vytlačen do horních vrstev, a tím se zvětší odpor tyče. Při rozběhu se, díky klesání kmitočtu v rotoru, zmenšuje nerovnoměrnost rozložení proudu v tyči. Při jmenovitém skluzu je už pak proud rozložen v tyči rovnoměrně. Při provozních otáčkách má pak tento ty motoru o něco menší rozptylovou reaktanci než při rozběhu, a tím se zmenší i $\cos\varphi$ a moment. Oproti normálnímu motoru zaznamenáváme nárůst záběrového momentu a omezení záběrového proudu.

5.3.5. Spouštění střídavým měničem napětí

Použitím střídavých měničů napětí (tzv. softstartéry) je možno dosáhnout plynulého rozběhu a snížení energetických ztrát. Dá se u nich nastavit rampa napětí, doba rozběhu, proudové omezení atd. Dá se takto realizovat i brzdění motoru, při čemž měnič působí jako usměrňovač a napájí statorové vinutí stejnosměrným proudem.

5.4. Spouštění asynchronních motorů s kotvou kroužkovou

Asynchronní motor s vinutým rotorem se spouští zařazováním spouštěcího rezistoru R_s do obvodu rotoru, který je přes kartáče a kroužky připojen k trojfázovému vinutí rotoru spojenému do hvězdy. Stator motoru se připojí na síť při maximálním R_s , který se během spouštění postupně snižuje, až je na konci rozběhu zcela vyřazen a vinutí rotoru je spojeno nakrátko. Zvětšováním odporu v obvodu rotoru se zmenšuje záběrný proud, přičemž se zvětšuje záběrný moment.

5.5. Řízení otáček asynchronních strojů

Všechny možné způsoby řízení otáček asynchronních motorů vychází ze základního vzorce pro výpočet synchronních otáček,

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} \quad [-; \text{Hz}; -] \quad (34)$$

do kterého dosadíme n_s ze vzorce (27).

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad [-] \quad (27)$$

Po dosazení a vyjádření otáček dostáváme:

$$n = n_s \cdot (1 - s) = \frac{60 \cdot f}{p} \cdot (1 - s) \quad [-; \text{Hz}; -] \quad (35)$$

Pokud k tomuto dojdeme, můžeme říct, že otáčky lze regulovat následujícími způsoby:

- Změnou skluzu
- Změnou počtu pólů (resp. počtu pólových dvojic)
- Změnou frekvence statoru

5.5.1. Řízení otáček změnou skluzu

Zde je třeba si uvědomit dva základní vzorce. A sice to jsou pro rotorové napětí,

$$U_2 = s \cdot U_{20} \quad [\text{V}] \quad (36)$$

a pro převod napětí.

$$p_u = \frac{U_1}{U_{20}} \quad [-; \text{V}] \quad (37)$$

Pak po dosazení vzorce pro převod napětí do vzorce pro rotorové napětí dostaneme:

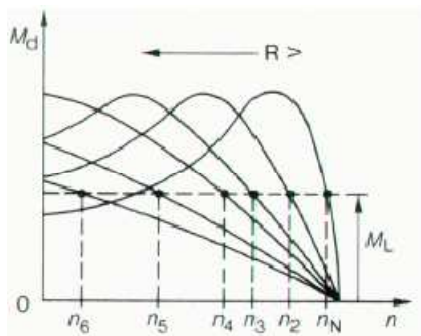
$$U_2 = s \cdot \frac{U_1}{P_u} = R_2 \cdot I_2 \quad [V; W; \Omega; A] \quad (38)$$

Pokud dále dosadíme z této rovnice do rovnice pro výpočet otáček (35), popsany v kapitole 5.5., dostáváme:

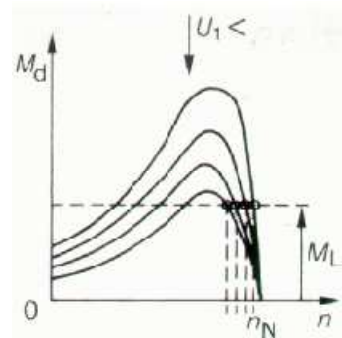
$$n = \frac{60 \cdot f}{p} \cdot \left(1 - \frac{R_2 \cdot I_2}{\frac{U_1}{P_u}} \right) \quad [-; Hz; \Omega; A; V; W] \quad (39)$$

Zde už tedy můžeme vidět, kterými veličinami můžeme ovlivnit skluz motoru, a tedy jak regulovat otáčky. Jedná se tedy především o regulaci:

- odporem v rotoru (obr. 35a)
- satorovým napětím (obr. 35b)



Obr.34a Regulace odporem rotoru^[4]



Obr.34b Regulace satorovým napětím^[4]

Je třeba také zmínit, že s nárůstem skluzu klesá účinnost motoru. To dokladuje následující vztah.

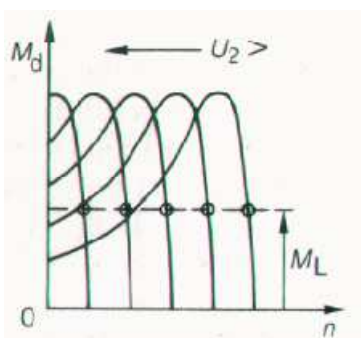
$$\eta = \frac{P}{P_p} = \frac{P_p \cdot (1-s)}{P_p} = (1-s) \quad [-; W; -] \quad (40)$$

5.5.2. Řízení otáček změnou pólových dvojic

Tento způsob řízení otáček umožňuje změnu pouze po stupních. Stupně, po kterých měníme otáčky, odpovídají synchronním otáčkám při různém počtu pólů. Realizace takovýchto změn je řešena tak, že stator má několik samostatných vinutí s různým počtem pólů, jedno vinutí přepínatelné nebo se oba způsoby kombinují. To však vede ke zvětšení rozměrů celého stroje a jeho hmotnosti.

5.5.3. Řízení otáček změnou frekvence statoru

Tímto způsobem lze řídit otáčky v poměrně širokém rozsahu. Je však zapotřebí mít k dispozici zdroj frekvence napájecího napětí – frekvenční měnič. K hospodárnému řízení otáček tímto způsobem však nestačí měnit pouze frekvenci, nýbrž i statorové napětí a to tak, aby magnetický indukční tok zůstal po celou dobu provozu konstantní. Momentová charakteristika řízení otáček změnou napájecí frekvence je na obr. 34c.



Obr.34c Regulace změnou napájecí frekvence^[4]

6. Rozbor provedení současného pohonného systému krystalizátoru plazmové pece

Tato část práce se zabývá popisem stávajícího systému pohánění a řízení unášече vsázky v plazmové peci. Zabývá se částí elektroinstalace začínající v rozvaděči v dané laboratoři a končící samotným unášecem vsázky (obr. 11).

6.1. Základní popis a definice problému

Nad unášecem je umístěn plazmový hořák, s jehož pomocí dochází k přetavování vloženého materiálu. Účelem funkce pohonného systému potom je, rovnoměrně pohybovat unášecem tak, aby došlo k rovnoměrnému prohřátí (přetavení) zpracovávaného materiálu. Obsluha pece ovládá rychlost pohybu unášече vsázky řízením otáček stejnosměrného motoru změnou jeho kotevního napětí. Toto se děje pomocí ovládacího pultu (obr. 36).

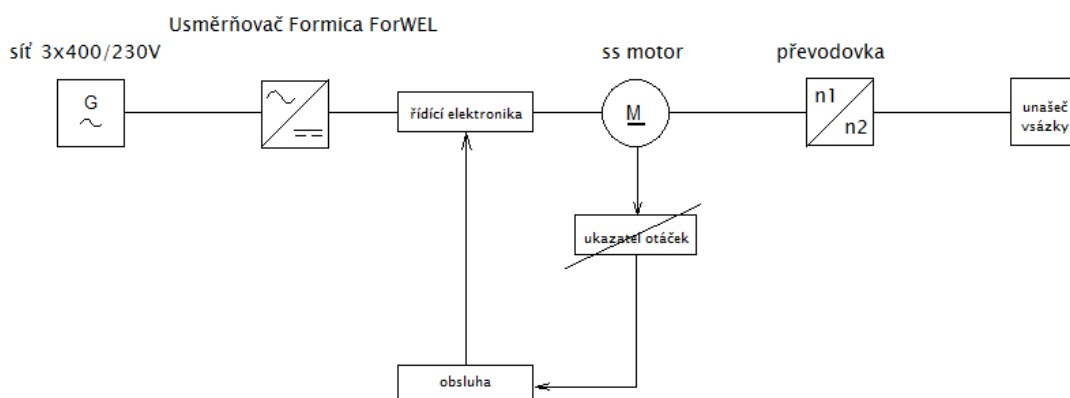
Hlavní problém současného stavu spočívá ve zpoždění mezi nastavením požadované rychlosti obsluhou a jejího skutečného dosažení. Průměrná doba zpoždění je 4 s. Je to způsobeno ztrátami při průchodu proudu a napětí skrze dnes již velmi zastaralý elektronkový řídicí obvod.

Dalšími problémy jsou nepřesné nastavování rychlosti a nemožnost určení nastavené rychlosti. Tyto problémy způsobuje málo citlivý ovladač kotevního napětí (obr. 36, bod 1) a nefunkční analogový čítač otáček (obr. 8, bod 3), resp. nefunkční tachogenerátor (obr. 37), který je součástí převodovky.

Jinými slovy obsluha nemá možnost zjistit, jak rychle se unášеч pohybuje (pokud nebereme v potaz pohled skrze kukátko krystalizátoru), a dále nemá možnost jeho rychlost upravit na přesně požadovanou hodnotu. A i v případě, že by se jí těchto možností dostalo, odezva při nastavení rychlosti není dostatečně rychlá.

6.2. Výčet součástí a blokové schéma

Pohonný systém krystalizátoru plazmové pece umístěné v laboratoři J129 na půdě Vysoké školy Báňské – Technické univerzity Ostrava sestává z rozvaděče rm1, napájecího usměrňovače Formica ForWEL 1200 GOLEM (obr. 15), elektronkového řídicího obvodu, elektromotoru (obr. 14), převodovky (obr. 12) a unášecem vsázky uvnitř krystalizátoru (obr. 11). Na obr. 35 je vidět blokové schéma současného stavu pohonného systému. Veškerá zpětná vazba, včetně kontroly pojezdu unášече, je prováděna obsluhou. Ve schématu je ukazatel otáček přeškrtnut z důvodu jeho současné nefunkčnosti. Obsluha má tedy jen omezenou možnost zjištění stavu otáček, a to podle „vytočení“ regulátoru otáček na panelu ovládání (obr. 36). Pro kreslení schémat byl použit program ProfiCAD 6.7.2.



Obr.35 Blokové schéma současného stavu pohonu



Obr.36 Ovládací panel

1 – ovladač otáček, 2 – ovladač přívodu elektrické energie, 3 – ovladač směru otáčení

6.3. Popis vybraných součástí

6.3.1. Rozvaděč RM1

Jedná se o klasický oceloplechový rozvaděč pro soustavu TN-S 3x400/230 V, 50 Hz. Rozvaděč byl vyroben firmou EZ Brno a jeho štítkové údaje jsou v tabulce 1. Rozvaděč je vybaven nožovými pojistkami, digitálním a analogovým elektroměrem.

Tab.1 Štítkové údaje rozvaděče RM1

Výrobní číslo	Typ	Norma	Napětí [V]	Proud [A]	Výkon [kW]	Frekvence [Hz]	Krytí
4462/78-Z	SN26	ČSN 357107	380	400	32	50	IP 40

6.3.2. Elektronkový řídicí obvod

Jedná se o elektronický řídicí obvod, jehož funkcí je řídit kotevní napětí na stejnosměrném elektromotoru. Výkonová část obvodu je tvořena elektronkovými součástkami, z čehož vyplývá, že obvod funguje jako usměrňující zesilovač. K samotnému řízení je potřeba použít k napájení zdroj s regulovatelným napětím. Hodnota tohoto napětí je regulována na ovládacím panelu (obr. 36, bod 1), který však již nedisponuje potřebnou citlivostí a výsledné řízení je tedy silně nepřesné. To se potvrdilo i během prováděných měření, kdy se otáčky nepodařilo nastavit s přesností větší než $\pm 150\text{--}250 \text{ min}^{-1}$ (tento údaj je však třeba brát pouze jako orientační, neboť na přesnost řízení nebylo prováděno samostatné měření; údaj je pouze odpozorován). Z elektronkové konstrukce vyplývá také důvod nežádoucího zpoždění při řízení rychlosti posuvu unášče vsázky uvnitř pracovního prostoru plazmové pece. Mezi základní vlastnosti elektronek totiž patří, že ke své funkci emise elektronů z katody využívají žhavicí se vlákno, kterému samozřejmě nějakou dobu trvá, než se nažhaví na požadovanou teplotu (cca 800°C). Přesné schéma zapojení, výrobce ani rok výroby se nepodařilo určit. Pro výsledný návrh nového pohonu řízení však tyto údaje nebyly směrodatné (návrh počítá s odstraněním stávajícího stejnosměrného zapojení), a proto nebyly dále řešeny.

6.3.3. Elektromotor

Jedná se o stejnosměrný elektromotor s cizím buzením pro nepřetržitý chod, jehož štítkové údaje jsou uvedeny v tabulce 2. Motor byl vyroben firmou MEZ Brno n.p. v roce 1965. Změřená charakteristika motoru je uvedena jako výstup měření 1. Jeho fotografie je na obr. 14.

Tab.2 Štítkové údaje motoru pohonu krystalizátoru

Výrobní číslo	Typ	Jmenovitý proud [A]	Jmenovité napětí [V]	Výkon [kW]	Buzení [V]	Otáčky [min^{-1}]	Krytí
2610843	EMN 06b P020	3,2	160	0,4	220	2800	IP 21/b

6.3.4. Převodovka

Jedná se o převodovku s převody v olejové lázni (obr. 12). Z měření 1 byl vypočten převodový poměr 1:51. Vzhledem k absenci jakékoliv dokumentace či štítku, a také vzhledem k letitosti zařízení se nepodařilo žádné další údaje opatřit (výrobce, rok výroby atd.). Lze pouze doplnit, že je převodovka vybavena tachogenerátorem firmy MEZ Náchod s datem výroby 1975. Základní štítkové údaje jsou uvedeny v tabulce 3; fotografie na obr. 37. Na přiloženém DVD disku je pak dokumentace výrobce (fa ATAS elektromotory Náchod a.s.).

Tab.3 Štítkové údaje tachogenerátoru

Výrobní číslo	Typ	Rozsah otáček [min^{-1}]	Maximální proud [A]	Frekvence [Hz]	Krytí
C 3611022	J13A1	1000 – 10 000	0,02	50	IP 43

Vzhledem k nefunkčnosti čítače otáček na panelu pece (obr. 8, bod 3) lze předpokládat, že je nefunkční i tachogenerátor.



Obr.37 Tachogenerátor pro sledování otáček (nefunkční)

6.4. Měření 1

Toto měření bylo provedeno za účelem zjištění mechanických charakteristik stejnosměrného motoru, a také sloužilo pro výběr nového pohonného systému. Dále byl z měření vypočten převodový poměr převodovky. K měření byl použit digitální otáčkoměr značky CEM AT-6 (obr. 38 a dokumentace na příloženém DVD disku).

Před samotným měřením bylo nejprve třeba označit hřídele motoru a převodovky po obvodu proužky reflexního papíru o rozměrech 1x1 cm. U hřídele motoru stačil jeden takovýto proužek. U hřídele převodovky bylo zapotřebí, z důvodu nízkého počtu otáček vzhledem ke vzorkovací frekvenci otáčkoměru, těchto proužků více (viz. DVD dokumentace otáčkoměru CEM AT-6). Konkrétně byl počet proužků pro hřídel převodovky stanoven na tři (naměřené otáčky pak bylo třeba i stejným číslem podělit).

Bylo změřeno, že motor je řízen v pracovním rozsahu otáček $325 - 2684 \text{ min}^{-1}$ při výkonu 0,4 kW. Z toho byly vypočteny hodnoty momentů, kterými motor působí na vstupní stranu převodovky. Nový systém musí být tedy zpracován tak, aby při stejných otáčkách vykazoval minimálně stejné hodnoty momentů. Jinak není zaručen spolehlivý a plynulý chod soustavy.

$$M_{\min} = \frac{60 \cdot P}{2\pi \cdot n_{\min}} = \frac{60 \cdot 400}{2\pi \cdot 325} = 11,7530 \text{ Nm} \quad (\text{ze vzorce 24})$$

$$M_{\max} = \frac{60 \cdot P}{2\pi \cdot n_{\max}} = \frac{60 \cdot 400}{2\pi \cdot 2684} = 1,4231 \text{ Nm} \quad (\text{ze vzorce 24})$$

M_{\min} hodnota momentu pro minimální změřenou hodnotu otáček n_{\min}

M_{\max} hodnota momentu pro maximální změřenou hodnotu otáček n_{\max}

Průběh měření byl následující. Na ovládacím pultu (obr. 36) bylo postupně nastaveno pět úrovní rychlostí otáček. Pro každé nastavení pak byly ze vzdálenosti cca 10 cm měřeny otáčky stisknutím tlačítka „MEAS“ na otáčkoměru. Měření probíhalo jak na hřídeli převodovky, tak na hřídeli motoru. U převodovky bylo zapotřebí výsledek podělit třemi (viz. předchozí odstavec). Z hodnot naměřených na hřídeli motoru a z jeho štítkového výkonu byl vypočten (podle vzorce 24) moment motoru a zpracována jeho mechanická charakteristika (obr. 39). Porovnáním otáček na hřídeli motoru s otáčkami na hřídeli převodovky pak získáváme převodový poměr i roven 51. Následuje příklad výpočtu.

$$i = \frac{n_m}{n_p} = \frac{2684}{52,3} = 51,32 \cong 51$$

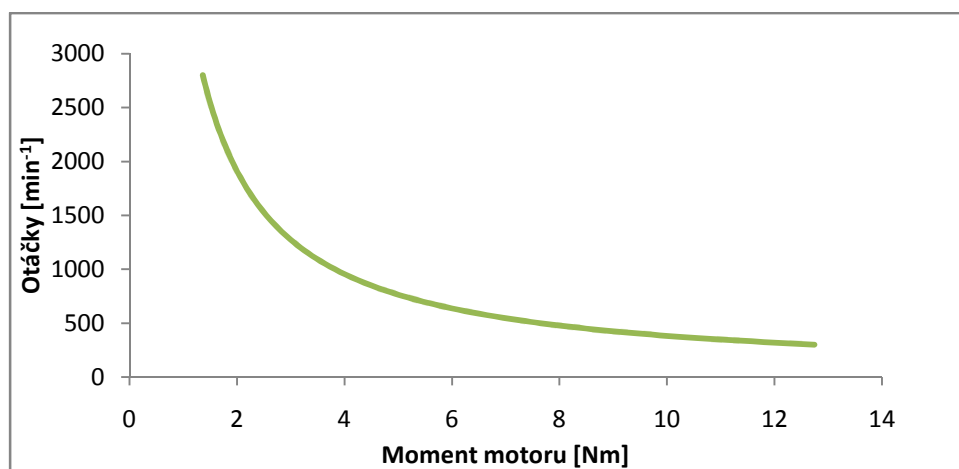
n_m okamžité otáčky na hřídeli motoru

n_p okamžité otáčky na hřídeli převodovky

Bylo měřeno s chybou $\pm 0,05\% + 1$ digit. Veškeré výsledky i naměřené hodnoty jsou uvedeny na DVD v souboru „Měření 1.xlsx“.



Obr.38 Digitální otáčkoměr CEM AT-6



Obr.39 Mechanická charakteristika stávajícího ss motoru

6.5. Měření 2

Zde byla snaha zjistit co nejpřesněji prodlevu mezi nastavením požadované hodnoty otáček a odezvy, kterou je myšleno jejího skutečného dosažení na hřídeli rotoru. Kromě digitálního otáčkoměru CEM AT-6 (viz. Měření 1) byly navíc použity stopky.

V momentě nastavení otáček na ovládacím panelu (obr. 36), byly zapnuty stopky a digitálním otáčkoměrem měřeny otáčky na hřídeli. Vzhledem k nemožnosti přesného zjištění nastavených otáček (nefunkční ukazatel otáček na panelu pece - obr. 8, bod 3), byly otáčky měřeny až do jejich ustálení. Pak byly stopky zastaveny, čas odečten a zaznamenán. Bylo měřeno zpoždění pro šest náhodně nastavených změn rychlosti motoru. Naměřené hodnoty jsou zpracovány v souboru „Měření 2.xlsx“ na přiloženém DVD. Výsledkem měření je zpoždění o hodnotě $(4,05 \pm 0,08)\text{s}$.

Tímto měřením bylo zdokumentováno zpoždění, které má být dle požadavků na návrh nového způsobu řízení pohonu eliminováno (kap. 7.1.).

7. Návrh nového systému pro pohon posuvu krystalizátoru

Tato kapitola je samotné řešení práce. Řeší návrh nového systému pro pohon posuvu krystalizátoru dané plazmové pece na půdě Vysoké školy Báňské – Technické univerzity Ostrava.

7.1. Požadavky

Požadavek na návrh nového řízení pohybu unášече vsázky je, aby pohon umožňoval regulaci rychlosti motoru v rozsahu otáček $325 - 2684 \text{ min}^{-1}$ při minimálních hodnotách momentů na hřídeli při co nejmenším zpoždění mezi nastavením otáček a jejich skutečným dosažením. Motor musí dále působit na vstupní stranu převodovky momenty o minimálních velikostech 11,7530 Nm a 1,4231 Nm (pro uvedené mezní hodnoty otáček 325 min^{-1} a 2684 min^{-1}). Doba současného zpoždění byla Měřením 2 určena ($4,05 \pm 0,08$)s. Rozsah otáček vychází ze skutečných naměřených hodnot za provozu zařízení. Požadavek na přesnost regulace (rozdíl mezi nastavenou a skutečnou hodnotou otáček) nebyl zadán. Tato práce se nicméně snaží, aby tento rozdíl byl co nejmenší.

7.2. Předpisy

Navržené zařízení odpovídá předpisům platným v době zpracování (tabulka 4).

Tab.4 *Soupis platných legislativních nařízení*

Předpis	Číslo	Obsah
Nařízení vlády	616/2006 Sb.	o technických požadavcích na výrobky z hlediska jejich elektromagnetické kompatibility
Zákon	309/2006 Sb.	kterým se upravují další požadavky bezpečnosti a ochrany zdraví při práci
Zákon	262/2006 Sb.	Zákoník práce.
Nařízení vlády	101/2005 Sb.	o podrobnějších požadavcích na pracoviště a pracovní prostředí
Nařízení vlády	24/2003 Sb.	kterým se stanoví technické požadavky na strojní zařízení
Nařízení vlády	17/2003 Sb.	kterým se stanoví technické požadavky na elektrická zařízení nízkého napětí
Nařízení vlády	378/2001 Sb.	kterým se stanoví bližší požadavky na bezpečný provoz strojů, technických zařízení, přístrojů a náradí
Zákon	22/1997 Sb.	o technických požadavcích na výrobky
Vyhláška	48/1982 Sb.	kterou se stanoví základní požadavky na zajištění bezpečnosti práce a technických zařízení
Vyhláška	73/2010 Sb.	kterou se určují vyhrazená elektrická zařízení a stanoví některé podmínky k zajištění jejich bezpečnosti
Vyhláška	50/1978 Sb.	o odborné způsobilosti v elektrotechnice

7.3. Normy

Veškerá navržená zařízení musí odpovídat platným českým technickým normám (tabulka 5).

Tab.5 *Soupis platných norem*

Označení normy	Název normy
ČSN 33 1500	Elektrotechnické předpisy. Revize elektrických zařízení.
ČSN 33 2000-3	Elektrotechnické předpisy. Elektrická zařízení. Část 3: Stanovení základních charakteristik.
ČSN 33 2000-4-41	Elektrotechnické předpisy - Elektrická zařízení - Část 4: Bezpečnost - Kapitola 41: Ochrana před úrazem elektrickým proudem.
ČSN 33 2000-4-42	Elektrotechnické předpisy. Elektrická zařízení. Část 4: Bezpečnost. Kapitola 42: Ochrana před účinky tepla.
ČSN 33 2000-4-43	Elektrotechnické předpisy. Elektrická zařízení. Část 4: Bezpečnost. Kapitola 43: Ochrana proti nadproudům.
ČSN 33 2000-4-47	Elektrotechnické předpisy - Elektrická zařízení - Část 4: Bezpečnost - Kapitola 47: Použití ochranných opatření pro zajištění bezpečnosti - Oddíl 470: Všeobecně - Oddíl 471: Opatření k zajištění ochrany před úrazem elektrickým proudem.
ČSN 33 2000-4-473	Elektrotechnické předpisy. Elektrická zařízení. Část 4: Bezpečnost. Kapitola 47: Použití ochranných opatření pro zajištění bezpečnosti. Oddíl 473: Opatření k ochraně proti nadproudům.
ČSN 33 2000-4-481	Elektrotechnické předpisy - Elektrická zařízení - Část 4: Bezpečnost - Kapitola 48: Výběr ochranných opatření podle vnějších vlivů - Oddíl 481: Výběr opatření na ochranu před úrazem elektrickým proudem podle vnějších vlivů.
ČSN 33 2000-5-51 ed2	Elektrotechnické předpisy - Elektrická zařízení - Část 5: Výběr a stavba elektrických zařízení - Kapitola 51: Všeobecné předpisy.
ČSN 33 2000-6-61 ed2	Elektrická instalace budov. Část 6: Revize. Kapitola 61: Postupy při výchozí revizi.
ČSN 33 2130	Elektrotechnické předpisy. Vnitřní elektrické rozvody
ČSN 33 3051	Ochrany elektrických strojů a rozvodných zařízení.
ČSN 33 3210	Elektrotechnické předpisy, rozvodná zařízení, společná ustanovení.
ČSN 33 3240	Elektrotechnické předpisy, stanoviště transformátorů.
ČSN 341610	Elektrotechnické předpisy, elektrický silnoproudý rozvod v průmyslových provozovnách.
ČSN EN 292-2	Bezpečnost strojních zařízení – Základní pojmy, všeobecné zásady pro projektování - Část 2: Technické zásady a specifikace
ČSN EN 418	Bezpečnost strojních zařízení – Zařízení nouzového zastavení
ČSN EN 457	Bezpečnost strojních zařízení – Akustické signály
ČSN EN 60204-1	Bezpečnost strojních zařízení – Elektrická zařízení pracovních strojů - Část 1: Všeobecné požadavky
ČSN EN 50110-1	Obsluha a práce na elektrických zařízeních.

7.4. Napět'ová soustava

Zařízení je navrženo pro napět'ovou soustavu 3xPEN, 50 Hz, 400/230 V/TN-S.

7.5. Ochrana před úrazem elektrickým proudem

Obecně bude ochrana před úrazem elektrickým proudem provedena uplatněním odpovídajících opatření stanovených v následujících oddílech normy ČSN 33 2000-4-41:

- základní ochrana izolací
- základní ochrana kryty nebo přepážkami
- ochrana při poruše automatickým odpojením od zdroje

7.6. Vnější vlivy

Objektem pro posouzení vnějších vlivů byla laboratoř J129 , ve které se v současnosti zařízení s plazmovou pecí nalézá. Laboratoř je v budově VŠB – TU Ostrava, na ulici 17. listopadu. Laboratoř slouží výhradně k vědeckým účelům, a přístup do ní mají pouze schválené osoby znalé. Protokol byl vypracován v souladu s ČSN 33 2000-3 a jeho nezkrácená podoba je v souboru „Protokol o určení vnějších vlivů J129.pdf“ na přiloženém DVD. Výstupem protokolu je konstatování, že daný prostor je z hlediska vnějších vlivů prostorem nebezpečným.

7.7. Technické řešení

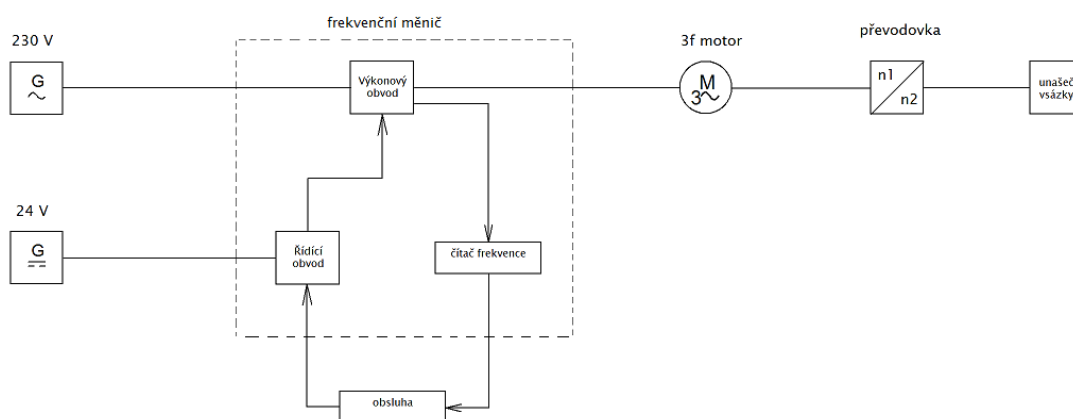
Původním záměrem bylo navrhnout pouze nové stejnosměrné řízení motoru. Po konzultaci s firmami zabývajícími se danou problematikou však bylo zjištěno, že takové řešení by pro daný výkon motoru bylo technicky a finančně zbytečně náročné. Proto bylo rozhodnuto, že návrh nového řízení bude proveden pomocí přechodu na střídavou soustavu. Toto bude provedeno za pomoci frekvenčního měniče a asynchronního motoru s rotorem nakrátko.

Nejprve bylo třeba zvolit mezní hodnotu výkonu pro volbu motoru. Z požadavků na nový systém (kap. 7.1.) byla následujícím výpočtem zvolena minimální hodnota 0,4 kW. Dále bylo třeba porovnat nabídku prodáváných motorů a měničů, a vybrat takové, u kterých by se shodoval jmenovitý výkon. Za konečnou hodnotu výkonu pro výběr těchto součástí byla zvolena hodnota 0,75 kW. Motor musí dovolovat plynulé řízení otáček v minimálním rozsahu 325 – 2684 min⁻¹. Měnič pak musí disponovat dostatečným rozsahem říditelné frekvence a rychlou odezvou na povely obsluhy. Konkrétní přístroje jsou rozebrány v kap. 7.8.1. a 7.8.2.

$$P = M_{min} \cdot n_{min} \cdot \frac{2\pi}{60} = 11,7530 \cdot 325 \cdot \frac{2\pi}{60} = 400,0006 \cong 400 \text{ W}$$

$$P = M_{max} \cdot n_{max} \cdot \frac{2\pi}{60} = 1,4231 \cdot 2684 \cdot \frac{2\pi}{60} = 399,9876 \cong 400 \text{ W}$$

Jednofázové napájení měniče bude vyvedeno z rozvaděče 3rt5 (místnost J129) pomocí měděného kabelu 1,5 mm². Dle schématu „Návrh nového zapojení“ (příloha P02) bude měniči předřazen přídatný odrušovací filtr pro odrušení ve třídě A (dle ČSN EN 55011), nárazová tlumivka 10mH/5A a stykač $I > 5 A$ (dle ČSN EN 60 947-2). Napájení motoru bude provedeno z měniče třífázově, stíněným měděným kabelem 1,5mm². Stínění bude připojeno na svorku ochranného vodiče na straně měniče. Zařízení bude jištěno jističem 10 A s vypínací charakteristikou C (dle ČSN EN 60 898). Ochrana samočinným odpojením od zdroje pak proudovým chráničem s residuálním proudem 30 mA (dle ČSN EN 61 009-1). Na obr. 40 je vidět blokové schéma nového zapojení. Obvodové schéma je potom uvedeno v příloze pod označením „Návrh nového zapojení“.



Obr.40 Blokové schéma návrhu nového zapojení

7.8. Soupis vybraných přístrojů

Tab.6 Vybrané přístroje

Přístroj	Výrobce/Prodejce	Typ
Proudový chránič	OEZ s.r.o.	OLI-10C-1N-030AC
Jistič	OEZ s.r.o.	LPN 10C/1
Stykač	EPM Elektropřístroj s.r.o.	C9.01
Tlumivka	KONZULT Praha s.r.o.	10mH/5A
Frekvenční měnič	TECO/KONZULT Praha s.r.o.	E2 201-H1F
Elektromotor	Siemens s.r.o.	1LA7080-2AA10-ZL13

7.8.1. Frekvenční měnič

Z frekvenčních měničů byl vybrán měnič E2 201 – H1F (obr. 41) od firmy TECO Electric & Machinery Co., Ltd., která je v České republice zastoupená firmou KONZULT Praha s.r.o. Jedná se o měnič s jednofázovým 230 V napájením, který dovoluje řídit třífázový asynchronní motor. Za velikost dodávaného výkonu byla zvolena hodnota 0,75 kW (viz. kap. 7.7.). Měnič umožňuje nastavení frekvence s nejmenší možnou změnou 0,1 Hz. To poskytuje dostatečnou míru citlivosti pro danou aplikaci. Rozsah nastavení je 0,1 – 200 Hz. Zobrazení nastavené frekvence je samozřejmostí. Další funkcí je nastavení doby rozběhu (tedy dobu do

nastavení požadované frekvence na řízeném motoru). Zde je možné nastavení 0,1 – 999 s. Toto je nicméně pouze údaj pro měnič, a je platný pouze při frekvenci 50 Hz. Pod (příp. nad) tuto frekvenci doba rozběhu klesá (příp. stoupá) s lineární závislostí (str. 24 v souboru „Dokumentace měniče E2 KONZULT Praha.doc“ na přiloženém DVD). Dobu rozběhu (i doběhu) doporučuji nastavit na hodnotu 0,1 s. Při nastavovaných frekvencích 0,1 – 50 Hz se pak bude reálná doba rozběhu pohybovat v rozmezí 0,0002 – 0,1 s.

$$t_r = t_n \cdot \frac{f_n}{f_s} = 0,1 \cdot \frac{0,1}{50} = 0,0002 \text{ s}$$

$$t_r = t_n \cdot \frac{f_n}{f_s} = 0,1 \cdot \frac{50}{50} = 0,1 \text{ s}$$

t_r skutečná doba rozběhu
 t_n doba rozběhu nastavená na měniči
 f_n na měniči nastavená měnitelná frekvence
 f_s frekvence sítě

Je vidět značný pokles ve zpoždění oproti současnému stavu (viz kap. 6.5.). Čas navíc představuje jenom reakce motoru, která je ovšem dána jeho konstrukcí a nemůžeme ji nijak ovlivnit. Toto jsou základní funkce měniče, které jsou nezbytné pro řešení zadaného problému současného způsobu řízení. Soupis mnou doporučených nastavení ostatních funkcí je uveden v následující tabulce. Bližší popis funkcí je uveden v dokumentaci na přiloženém DVD.

Tab.7 Nastavení funkcí měniče

Označení	Název funkce	Nastavení	Popis nastavení
F_01	doba rozběhu	0,1	
F_02	doba doběhu	0,1	
F_03	způsob řízení	0	FORWARD/STOP; REVERSE/STOP
F_04	směr otáčení	0-1	0 = vpřed; 1 = vzad
F_05	závislost u/f	1/4	lineární charakteristika pro obecné použití
F_06	horní mez frekvence	50	
F_07	dolní mez frekvence	0	
F_08	pracovní frekvence	0-50	nastavování pracovní frekvence za provozu
F_09	frekvence posuvu	-	
F_10	možnosti řízení	1	pomocí dálkového ovládání
F_11	řízení frekvence	1	ext. potenciometrem nebo dálk. ovládáním
F_12	nosná frekvence	1	eliminace hluku a vibrací
F_13	zvýšení momentu	0	bez zvýšení momentu
F_14	způsob zastavení	-	
F_15	doba brzdění	-	
F_16	frekvence brzdění	-	
F_17	úroveň brzdění	-	
F_18	tepelná pojistka	71	nastavení podle hodnoty proudu motoru
F_19	tlačítko SP1	2	

F_20	tlačítko RESET	5	
F_21	výstupní svorka	3	signalizuje poruchový stav
F_22	reverzace	0	povolena
F_23	výpadek napětí	1	při výpadku je třeba provést ruční restart
F_24	automatický restart	0	neumožněn
F_25	tovární nastavení	-	uvede přístroj do tov. nastavení
F_26	přednastavení frekvence	-	
F_27	přednastavení frekvence	-	
F_28	start měniče	001	po připojení napětí je třeba zapnout i měnič



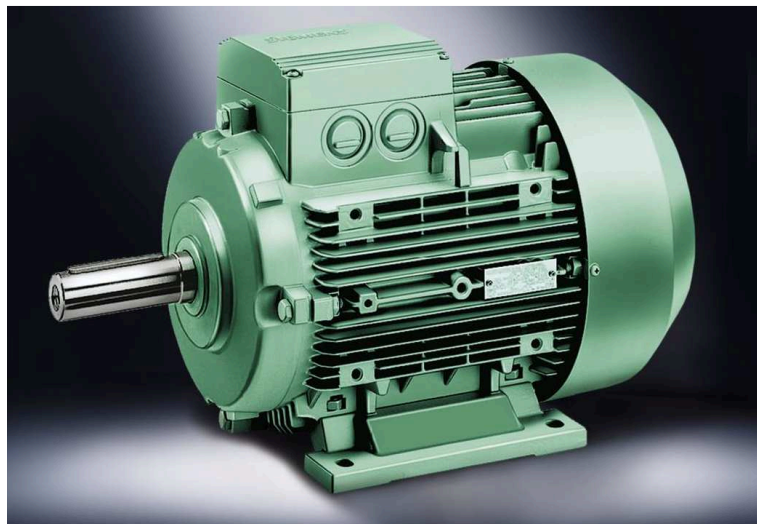
Obr.41 Frekvenční měnič TECO E201-H1F ^[9]

7.8.2. Elektromotor

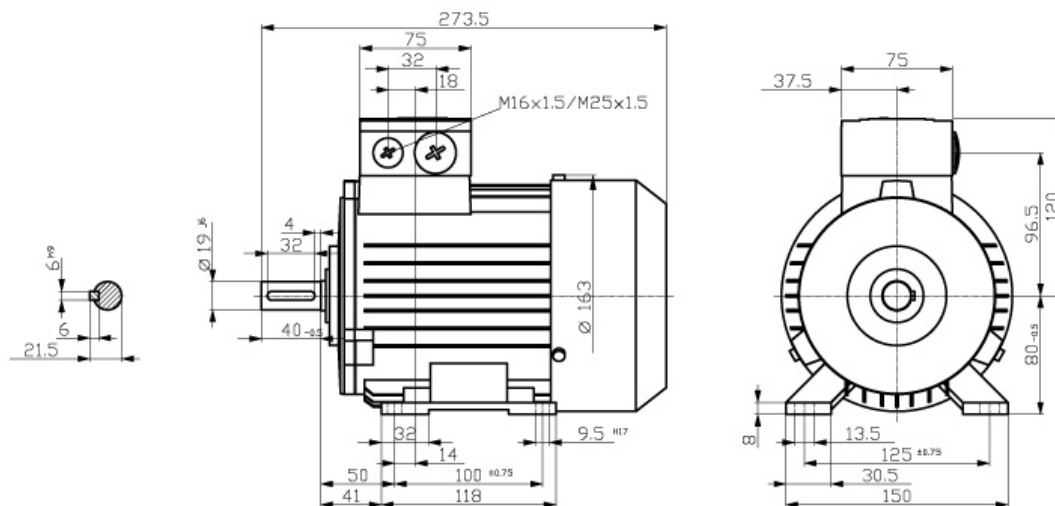
Z nabídky elektromotorů byl vybrán elektromotor Siemens 1LA7080-2AA10-ZL13. Jedná se o přírubový, dvoupólový, třífázový asynchronní motor s rotorem nakrátko o výkonu 0,75 kW. Jmenovité údaje jsou uvedeny v tabulce 8. Motor je ve zvláštním provedení s vnějším vyvedením ochranné svorky (označení ZL13). Bylo by možno jej vybrat i v provedení se snímačem otáček. Tím by však cena motoru vrostla na více než dvojnásobek. Pokud by časem vznikl požadavek na řízení rychlosti motoru nad synchronní otáčky, musel by motor být dovybaven modulem pro cizí chlazení. Tento požadavek však v současnosti není. Veškeré ostatní údaje jsou uvedeny na přiloženém DVD v souboru „Asynchronní 3f – 1LA7.pdf“. Fotografie typového provedení je na obr. 42. Rozměrový výkres je pak na obr. 43.

Tab.8 Jmenovité údaje motoru Siemens 1LA7080-2AA10-ZL13

Výkon [kW]	Napětí [V]	Proud [A]	Otáčky [min ⁻¹]	Účinník [-]	Účinnost [-]	Moment [Nm]
0,75	230/400	3	2855	0,86	0,73	2,5



Obr.42 Typové provedení motoru Siemens 1LA7080-1AA10-ZL13^[8]



Obr.43 Rozměrový výkres motoru Siemens 1LA7080-1AA10-ZL13^[8]

8. Závěr

Cílem diplomové práce byl návrh nového pohonu pro řízení pohybu unášече vsázky uvnitř pracovního prostoru plazmové pece - krystalizátoru. Práce obsahuje definice plazmy a obecný popis typové plazmové pece s vertikálním krystalizátorem. Dále je popsána také konkrétní řešení plazmová pec.

V současnosti je pohon pro řízení realizován pomocí nastavování kotevního napětí stejnosměrného motoru s cizím buzením. Tohoto nastavení se docílí za použití stejnosměrného elektronického měniče napětí. Nejdříve bylo třeba v rámci možností popsat jednotlivé komponenty a definovat nedostatky stávajícího zapojení. Za tyto nedostatky byly určeny nemožnost zjištění nastavené rychlosti motoru (a tedy i rychlosti unášече vsázky), nedostatečná citlivost ovládacího panelu, a příliš velká časová prodleva mezi nastavením rychlosti a jejího skutečného dosažení.

Tyto nedostatky byly určující pro návrh nového způsobu řízení. První uvažovanou variantou byla modernizace řídicího okruhu elektromotoru (návrh nového stejnosměrného měniče napětí). Po konzultacích s pedagogy Vysoké školy Báňské – Technické univerzity Ostrava a zástupci firem zabývajících se danou problematikou však bylo od této možnosti upuštěno. Důvodem byla technická složitost a z toho pramenící finanční náročnost (pro tak malé výkony motorů – 0,4 kW – se stejnosměrné měniče nevyrábí; bylo by třeba jej navrhnout a nechat speciálně vyrobit, což sebou nese poměrně značné finanční náklady). Proto bylo přistoupeno k návrhu střídavého pohonu, který by nahradil současný obvod až po převodovku (ta by zůstala ponechána).

Nový způsob řízení sestává ze střídavého zapojení frekvenčního měniče a asynchronního elektromotoru s kotvou nakrátko. Vybrané komponenty, včetně obvodového a blokového schéma, jsou v práci popsány a v přílohách (na DVD) uvedeny jejich dokumentace. Návrh nového způsobu řízení pohybu unášече vsázky eliminuje všechny zadané a popsané nedostatky stávajícího zapojení.

Seznam použité literatury

- [1] CHMELÍK, K. – Stejnoseměrné a komutátorové elektrické stroje, obecný stroj, VŠB – TU Ostrava, 2001, ISBN 80-7078-857-7
- [2] MĚŘIČKA, J.; HAMATA, V.; VOŽENÍLEK, P. – Elektrické stroje, ČVUT Praha, 2000, ISBN 80-01-02109-2
- [3] DEMBOVSKÝ, V. – Plazmová metalurgie, SNTL Praha, 1978, typové číslo L14-B3-V-41f/41744
- [4] CHMELÍK, K. – Asynchronní a synchronní elektrické stroje, VŠB – TU Ostrava, 2002, ISBN 80-248-0025-X

Seznam použité „šedé“ literatury

- [5] STOKLAS, P. – Plazmová rekrytalizační pec – návrh a realizace startovacího automatu plazmatronu, diplomová práce při VŠB – TU Ostrava, fakulta elektrotechniky a informatiky, 2010, vedoucí Ing. Martin Marek, PhD.
- [6] HRADÍLEK, Z. – Elektrotepelná technika, skriptum
- [7] NEBORÁK, I; SLÁDEČEK, V – Elektrické pohony KE, skriptum
- [8] http://www.elektromotory.net/upload/file/katalog_11f7.pdf – katalog nízkonapětových třífázových elektromotorů Siemens s kotvou nakrátko
- [9] <http://www.konzult.cz/rada-e2-0-2-2-2-kw/> – prodejce frekvenčních měničů TECO firma KONZULT PRAHA s.r.o.
- [10] http://www.atas.cz/files/J13A1-00_A2-00.pdf – dokumentace tachogenerátoru ATAS J13A1-00_A2-00
- [11] http://www.oez.cz/uploads/oez/files/ks/3286-Z01-11_CZ_SK.pdf - katalog jističů LPN OEZ do 63 A (10 kA)
- [12] http://www.oez.cz/uploads/oez/files/ks/4561-Z01-11_CZ_SK.pdf - katalog proudových chráničů OLI OEZ (10 kA)
- [13] <http://www.epm.cz/download/katalogy/epm-catalog-2011-cz.pdf> - katalog stykačů EPM Elektropřístroj s.r.o.

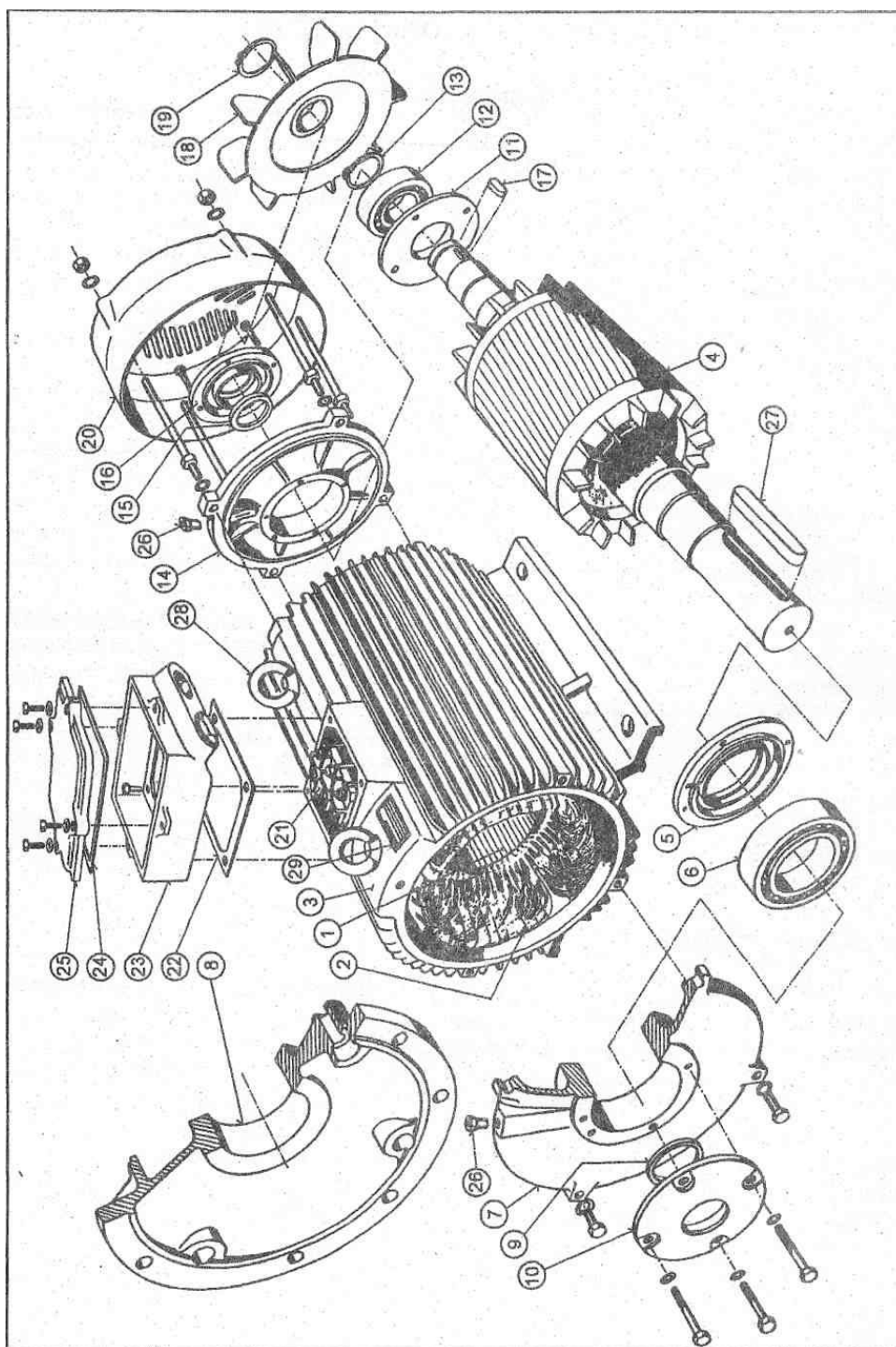
Seznam příloh

- P01 Asynchronní motor s kotvou nakrátko v rozloženém stavu
- P02 Návrh nového zapojení pohonu krystalizátoru – obvodové schéma

Seznam příloh na disku DVD

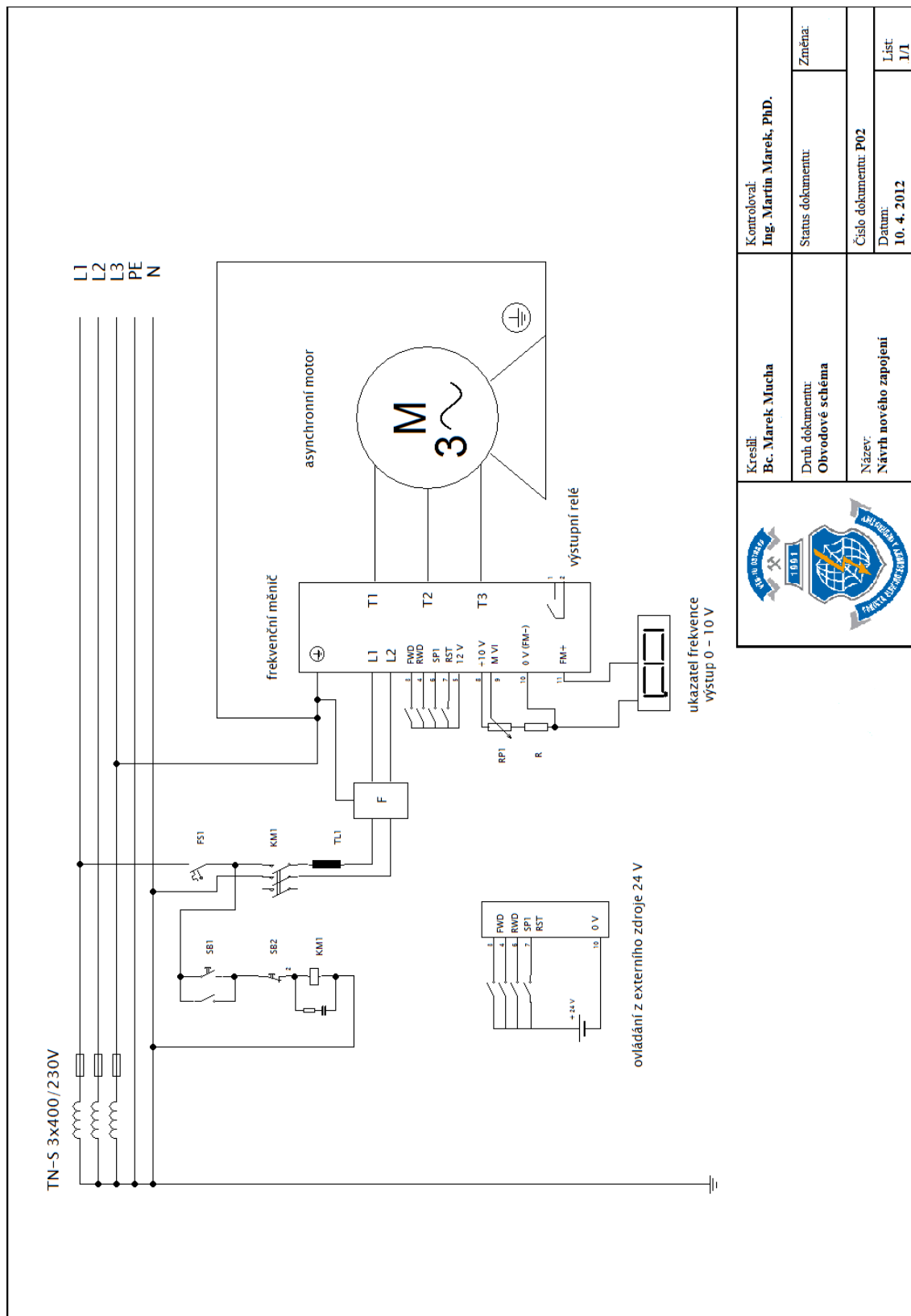
- EP01 Dokumentace měniče TECO E2 201 – H1F
- EP02 Katalog nízkonapěťových třífázových elektromotorů Siemens s kotvou nakrátko
- EP03 Dokumentace tachogenerátoru ATAS J13A1-00_A2-00
- EP04 Katalog jističů LPN OEZ do 63 A (10 kA)
- EP05 Manuál otáčkoměru CEM AT-6
- EP06 Protokol o určení vnějších vlivů místnosti J129
- EP07 Katalog proudových chráničů OLI OEZ (10 kA)
- EP08 Katalog stykačů EPM Elektropřístroj s.r.o.
- EP09 Měření 1
- EP10 Měření 2


PŘÍLOHY



Příloha P01 Asynchronní motor s kotvou nakrátko v rozloženém stavu^[4]

1 - magnetický obvod statoru, 2 - 3f vinutí statoru, 3 - kostra motoru, 4 - magnetický obvod rotoru s klecí nakrátko nalisovaný na hřídeli, 5 - ložiskové víčko zadní vnitřní, 6 - ložisko zadní, 7 - ložiskový štít zadní, 8 - přírubový ložiskový štít, 10 - ložiskové víčko zadní vnější, 11 - ložiskové víčko přední vnitřní, 12 - ložisko přední, 14 - ložiskový štít přední, 16 - ložiskové víčko přední vnější, 18 - ventilátor, 20 - kryt ventilátoru, 21 - svorkovnice, 23 - kryt svorkovnice, 24 - těsnění pod víko svorkovnice, 25 - víko svorkovnice, 26 - maznice, 27 - klín pro volný konec hřídele, 28 - závěsné oko, 29 - štítek.



	Kreslil: Bc. Marek Mucha	Kontroloval: Ing. Martin Marek, PhD.
	Druh dokumentu: Obvodové schéma	Status dokumentu: Změna:
	Číslo dokumentu: P02	
	Název: Návrh nového zapojení	Datum: 10. 4. 2012
		List: 1/1